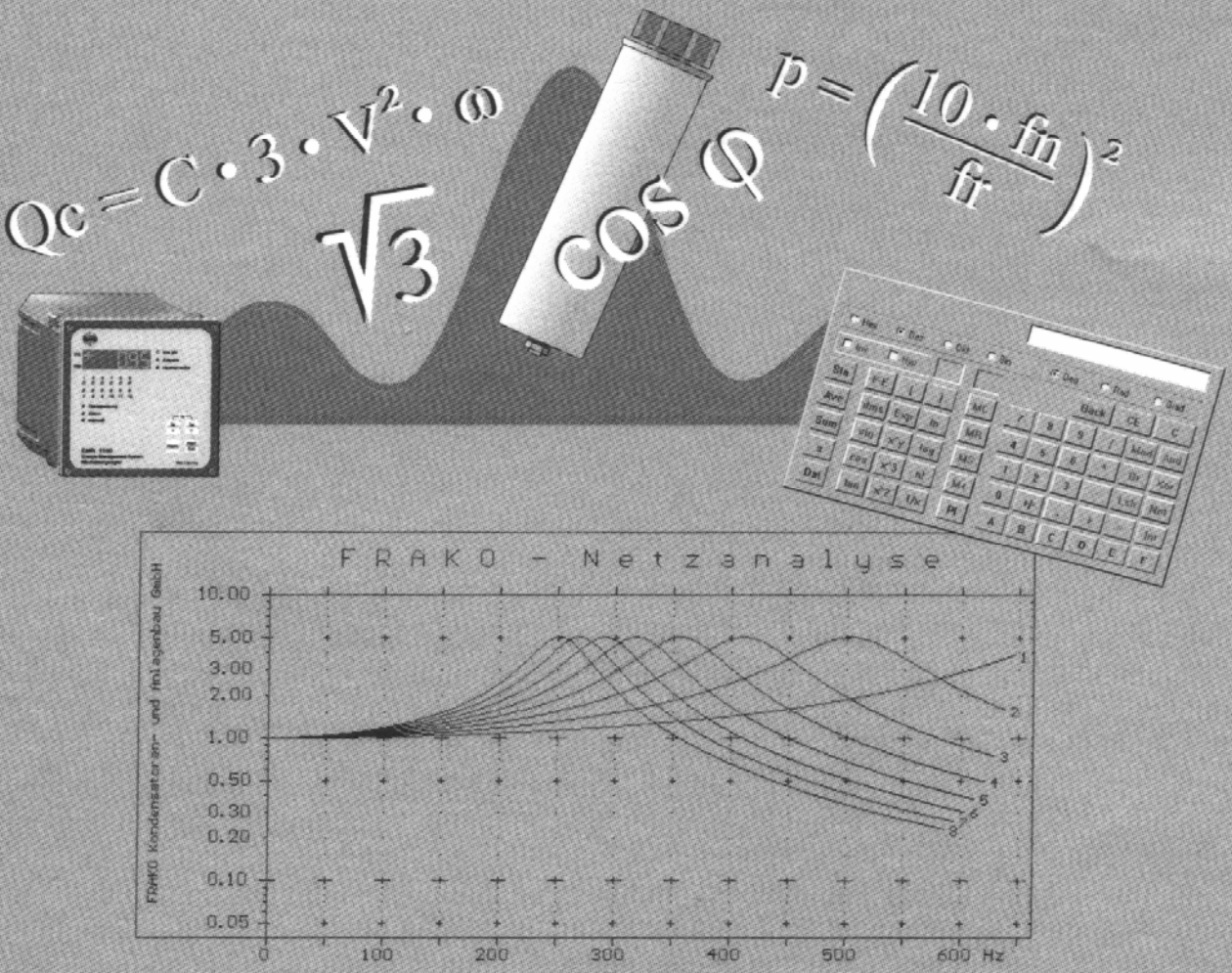
شرکت فراکوه

راهنمای اصلاح ضریب توان

FRAKO

همه چیز در خصوص جبران‌سازی توان راکتیو

برای استفادهٔ مهندسان مشاور و کاربران



Everything on the subject of power factor correction
for consulting engineers and users

مقدمه

تصحیح ضریب توان یکی از بهترین سرمایه‌گذاری‌ها برای کاهش هزینه‌های انرژی است که در زمانی اندک هزینهٔ خود را بر می‌گرداند. پیشرفت‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، قابلیت اطمینان و ظرفیت سیستم‌های جبران‌سازی را افزایش داده و نصب آن را ساده نموده است.

در بسیاری از موارد طراحی سیستم و برآورد ابعاد آن، به دلیل افزایش سالانهٔ هارمونیک‌ها چه در شبکه‌های فشار ضعیف و چه در شبکه‌های متوسط، سخت‌تر شده است. مبدل‌های قدرت، کنترل کننده‌های موتوری، مبدل‌های فرکانس ثابت، تلویزیون‌ها و کامپیوترها به شبکه هارمونیک تزریق می‌کنند. این هارمونیک‌ها ممکن است توسط امپدانس‌ها و خازن‌های شبکه تقویت شود.

باید در موقع طراحی‌های اولیه راه‌حل‌هایی اساسی پیش‌بینی شود تا از مشکلات بعدی جلوگیری گردد. بیش از ۱۸ سال است که متخصصان FRAKO تدابیر اساسی در مورد تحلیل شبکه انجام داده‌اند و در این زمینه مقالات متعددی به چاپ رسانده‌اند. بنابراین کاملاً مناسب به نظر می‌رسد که خلاصه و ماحصل این تحقیقات در یک راهنما به صورت یکپارچه به چاپ برسد.

سیستم‌های تصحیح ضریب توان برای کاهش هزینه‌ها نصب می‌شوند و در طول مدت ۱/۵ تا ۳ سال هزینهٔ خود را بر می‌گردانند و بعد از آن سیستم به سوددهی می‌رسد. بنابراین سیستم جبران‌سازی باید تا مدت زیادی به کار خود ادامه دهد.

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های فراکوه ساخت خازن‌هایی با قیمت کمتر و طول عمر بیشتر است:

- ✓ طول عمر بسیار زیاد که در عمل امتحان خود را پس داده است.
- ✓ مشخصهٔ کیفیت بارگذاری بسیار عالی.

طول عمر بسیار زیاد که در عمل امتحان خود را پس داده است، شامل نظارت بسیار دقیق و ثبت همهٔ موارد خرابی خازن‌ها است. FRAKO از سال ۱۹۹۱ تا به حال آمار خرابی‌ها را نگهداری می‌نموده و در این مدت تعداد خرابی‌ها حدود ۲۰۰ عدد در یک میلیون خازن گزارش شده است.

مشخصهٔ کیفیت بارگذاری بسیار عالی، به این معنی است که خازن‌های قدرت فراکوه می‌توانند:

۱. جریانی ۲ برابر جریان نامی خود در سطح ۴۰۰ ولت را به صورت دائمی تحمل کنند.
۲. جریانهای لحظه‌ای تا حدود ۳۳۰ برابر جریان نامی در سطح ۴۰۰ ولت را تحمل کنند.
۳. اضافه‌ولتاژ ۴۴۰ ولت (یعنی ۷٪ ولتاژ نامی) تا ۵۲۵ ولت (یعنی ۱۴٪ ولتاژ نامی) در سطح ۴۰۰ ولت را تحمل کنند.
۴. دمای بدنهٔ حدود ۴۰- درجه تا ۷۵+ درجهٔ سانتیگراد را تحمل کنند.

تجارب عملی فراکوه و کیفیت محصولات این شرکت همواره در جهت سود رسانی به مشتری در اولویت بوده است. شرکت فراکوه امیدوار است که این دفترچهٔ راهنما مرجع جدا نشدنی همهٔ متخصصان این امر گردد.

حسین شهابی

Version 1.0

❖ **اصول**

- ❑ توان اکتیو
- ❑ توان اکتیو و راکتیو
- ❑ توان راکتیو
- ❑ توان ظاهری
- ❑ ضریب توان
- ❑ چرا جبران‌سازی؟

❖ **انواع جبران‌سازی**

- ❑ جبران‌سازی انفرادی
- ❑ جبران‌سازی گروهی
- ❑ جبران‌سازی مرکزی
- ❑ جبران‌سازی ترکیبی

❖ **تعیین خازن مورد نیاز**

- ❑ بر اساس تعرفه‌های توان
- ❑ به وسیلهٔ اندازه‌گیری
- ❑ از طریق خواندن کنتور
- ❑ به وسیلهٔ قبض برق

❖ **کاربردها**

- ❑ جبران‌سازی گروهی
- ❑ جبران‌سازی انفرادی ترانس
- ❑ جبران‌سازی انفرادی موتور
- ❑ رگولاسیون توان راکتیو

❖ **مشخصات توان**

- ❑ خازن‌های قدرت
- ❑ رگولاتور توان راکتیو

❖ **نصب**

- ❑ ترانس جریان
- ❑ فیوزها و کابل
- ❑ سیم حفاظت

❖ **فرمول‌های محاسبات برای خازن**

❖ **هارمونیک‌ها**

- ❑ هارمونیک چیست؟ چگونگی ایجاد هارمونیک؟
- ❑ دامنهٔ هارمونیک‌ها پیش از نصب خازن چقدر هستند؟
- ❑ تأثیر هارمونیک‌ها بر تجهیزات جبران‌سازی بدون راکتور
- ❑ رزونانس چه زمانی به وجود می‌آید؟
- ❑ تأثیر آرایش شبکه
- ❑ اضافه‌ولتاژ و جریان هارمونیکی تجهیزات جبران‌سازی

❖ **چگونگی جبران‌سازی در حضور هارمونیک**

- ❑ اندازه‌گیری برای اجتناب از وقوع رزونانس

اصول:

پیش از پرداختن به جزئیات جبران‌سازی و چگونگی کنترل سیستم جبران‌سازی لازم است تا اطلاعات اولیه‌ای درباره جریان متناوب ارائه شود.

توان اکتیو:

در یک بار اهمی خالص بدون قسمت سلفی یا خازنی، مثل بخاری برقی، عبور از صفر جریان و ولتاژ روی هم قرار می‌گیرد (شکل ۱). جریان و ولتاژ در این حالت اصطلاحاً **هم‌فاز** هستند. از ضرب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ (U) و جریان (I) شکل توان اکتیو لحظه‌ای محاسبه می‌شود. فرکانس توان دو برابر فرکانس شبکه است و کاملا در قسمت بالا (مثبت) واقع می‌شود.

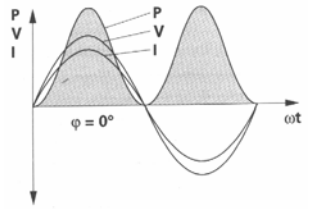
چون حاصل‌ضرب دو عدد منفی همیشه عددی مثبت است. $(-V).(-I)=(+P)$

توان اکتیو به فرمی غیر الکتریکی (مثل حرارت، نور، توان مکانیکی) تغییر شکل می‌یابد و از طریق کنتور ثبت می‌شود.

در بار اهمی خالص، توان اکتیو از حاصل‌ضرب مقدار موثر جریان (I) و ولتاژ (U) محاسبه می‌شود.

$$P = U.I$$

$$[W] = [V] \cdot [A]$$



شکل ۱: ولتاژ، جریان، و توان در بار اهمی $(\varphi = 0°)$

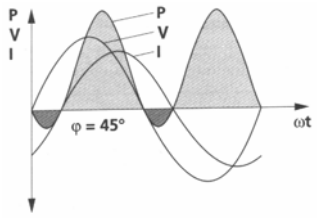
توان اکتیو و راکتیو:

در عمل، بیشتر اوقات بار خالص اهمی وجود ندارد. بلکه قسمت سلفی نیز به آن اضافه می‌گردد. این مطلب در تمامی مصرف‌کنندگانی که به میدان مغناطیسی احتیاج دارند مثل موتور آسنکرون، راکتور و ترانسفورماتور صادق است. همچنین مبدل‌ها و یکسوسازها برای کموتاسیون محتاج توان راکتیو هستند. جریانی که میدان مغناطیسی را به وجود می‌آورد و باعث تغییر قطب‌های آن می‌گردد، مصرف نشده بلکه به عنوان جریان راکتیو بین بار و ژنراتور رفت و آمد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، عبور از صفر ولتاژ و جریان دیگر بر روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند و تأخیری بین آن دو وجود دارد. در بارهای اندوکتیو جریان بعد از ولتاژ حرکت کرده و در بارهای خازنی جریان جلوتر از ولتاژ حرکت می‌کند. در این وضعیت از رابطهٔ $(U).(I)=(P)$ مقدار توان لحظه‌ای محاسبه می‌شود. چرا که اگر یکی از دو عدد منفی باشد، حاصل منفی می‌گردد.

مثالی با تأخیر فاز $\varphi = ۴۵°$ انتخاب شده این اختلاف فاز برابر ضریب توان ۰/۷۰۷ است. بخشی از منحنی توان در محدودهٔ منفی قرار می‌گیرد در این حالت توان اکتیو این‌گونه محاسبه می‌شود:

$$P = U.I.Cos\varphi$$

$$[W] = [V] \cdot [A]$$



شکل ۲: ولتاژ، جریان و توان در بار اهمی – سلفی $(\varphi = 45°)$

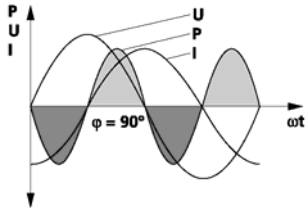
توان راکتیو:

در موتورها و ترانسفورموتورهای بی بار، اگر تلفات کابل‌ها، آهن و اصطکاک نادیده گرفته شود، آنچه باقی می‌ماند تنها توان راکتیو سلفی است.

در صورتی که منحنی‌های ولتاژ و جریان با یکدیگر ۹۰° اختلاف فاز داشته باشند نیمی از منحنی توان در ناحیه مثبت و نیمی دیگر در ناحیه منفی قرار می‌گیرد. در این حالت توان اکتیو صفر است چون ناحیهٔ مثبت و ناحیه منفی برابر هستند.

توان راکتیو که برای به وجود آوردن میدان الکترومغناطیسی بین ژنراتور و مصرف کننده در حال نوسان است، از رابطهٔ درون کادر زیر به دست می‌آید:

$$Q = U.I.Sin\varphi$$
$$[VAr] = [V] \,.\, [A]$$



شکل ۳: ولتاژ، جریان و توان در بار کاملاً سلفی $(\varphi = 90°)$

توان ظاهری:

توان ظاهری یک شبکه مشخص‌کنندهٔ میزان بارپذیری آن شبکه است.

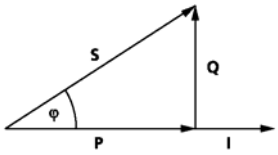
ژنراتور، ترانسفورماتورها، کلیدها، فیوزها و مقاطع سیم‌ها و کابل‌ها می‌بایستی برای توان ظاهری شبکه انتخاب گردند.

توان ظاهری حاصل‌ضرب مقدار ولتاژ و جریان بدون در نظرگرفتن اختلاف فاز آنها است.

توان ظاهری از جمع هندسی توان موثر و توان راکتیو به دست می‌آید.

$$S = U.I$$
[VA] = [V] . [A]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$
[VA]=[W][VAr]



شکل ۴: دیاگرام قدرت

ضریب توان:

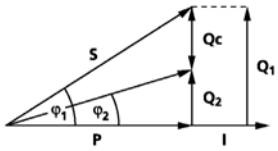
از کسینوس زاویهٔ اختلاف فاز جریان و ولتاژ می توان اجزاء ظاهری و مؤثر توان‌ها، ولتاژها، و جریان‌ها را محاسبه نمود؛ در عمل ضریب توان بدین صورت تعریف می‌شود:

$$Cos\varphi = \frac{P}{S}\frac{[W]}{[VA]}$$

در دستگاه‌های الکتریکی اصولاً ضریب توان برای بار کامل نوشته می‌شود. از آنجایی که شبکه برای توان ظاهری خاصی طراحی شده است، لذا سعی بر این است که مقدار توان ظاهری حتی‌الامکان پایین نگهداشته شود. در صورتی که خازن‌های مناسب به صورت موازی و در کنار مصرف‌کننده نصب شوند، بخشی از توان راکتیو بین خازن و مصرف‌کننده نوسان کرده، باقیمانده از شبکه کشیده می‌شود که میزان بارگذاری راکتیو شبکه را کاهش می‌دهد. در صورتی که به وسیلهٔ جبران‌سازی، ضریب توان به یک برسد در شبکه تنها جریان مؤثر وجود خواهد داشت.

Q_C توان راکتیوی که از خازن گرفته می‌شود، از اختلاف توان اکتیو Q_1 قبل از جبران‌سازی و بعد از جبران‌سازی Q_2 به دست می‌آید. لذا $Q_C = Q_1 - Q_2$

$$Q_C = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$
[VAr] [W]

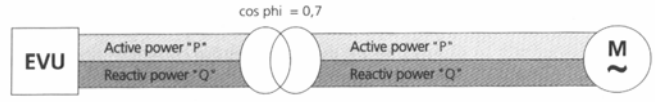


شکل ۵: دیاگرام اثر جبران‌سازی

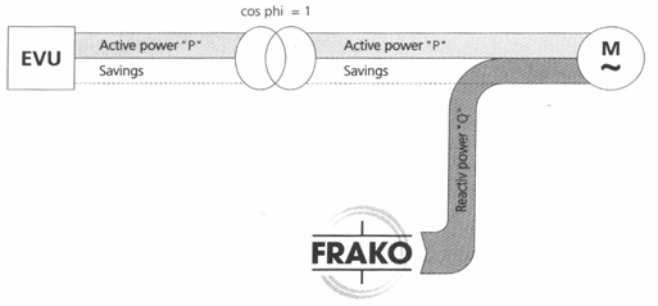
چرا جبران‌سازی؟

توان راکتیوی که بین ژنراتور و مصرف‌کننده در حال نوسان است در شبکه به گرما مبدل می‌شود. مولدها، ترانسفورماتورها، کابل‌ها و سیم‌کشی‌ها و کلیدها نیز بر اثر آن تحت اضافه‌بار قرار گرفته که تلفات و افت ولتاژ را به همراه دارند. در صورت زیادبودن مقدار توان اکتیو مصرفی ممکن است کابل‌ها و سیم‌ها، توان انتقال جریان برق را نداشته باشند و لازم باشد که کابل‌ها و سیم‌های دارای مقاطع بزرگ‌تری به کار گرفته شوند.

از نظر وزارت نیرو کوچک‌بودن ضریب توان، هزینه‌های تولید، انتقال و توزیع مخارج سرمایه‌گذاری و نگهداری تجهیزات در شبکه تولید برق را افزایش می‌دهد. این مخارج به هزینهٔ قبض‌های برق مصرف‌کننده‌ها اضافه می‌شود. به همین دلیل در مجاورت کنتور اکتیو یک کنتور راکتیو نیز نصب می‌شود.



شکل ۶: جریان اکتیو و راکتیو در شبکه بدون تجهیزات جبران‌سازی



شکل ۷: جریان اکتیو و راکتیو در شبکه به همراه تجهیزات جبران‌سازی

مزایای خازن گذاری:

استفادهٔ اقتصادی از

- ❑ ژنراتورها
- ❑ ترانسفورماتورها
- ❑ سیم‌ها و کابل‌ها
- ❑ کلیدها

کاهش تلفات و افت ولتاژ؛ در نتیجه

- ❑ مخارج کم انرژی

جبران‌سازی انفرادی:

در ساده‌ترین فرم، یک خازن با مقدار مناسب، موازی هر مصرف‌کنندهٔ سلفی نصب می‌شود. بدین وسیله به صورت چشم‌گیری از بار سیم‌ها و کابل‌ها کم می‌شود. باید دقت کرد که خازن فقط در محدودهٔ زمانی فعالیت دستگاه‌ها مورد استفاده واقع شود. در ضمـن نصب خازن برای جبران‌سازی انفرادی دستگاهها ساده نیست. (از قبیل مسائلی چون مکان و یا مخارج مونتاژ و نصب آن)

کاربرد

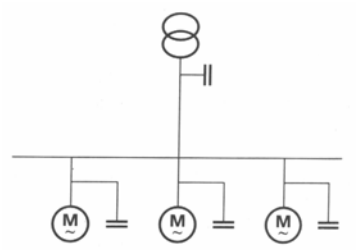
- ❑ جهت جبران‌سازی توان راکتیو بی‌باری ترانسفورماتورها
- ❑ برای موتورهای دائم‌کار
- ❑ برای موتورهای کم‌بار یا با کابل طولانی

مزایا

- ❑ شبکهٔ داخلی کاملاً از جریان راکتیو پاک می‌شود.
- ❑ مخارج کمتر برحسب $kVAr$

معایب

- ❑ جبران‌سازی در تمام کارخانه پخش شده است.
- ❑ نصب پیچیده
- ❑ به طور کلی به خازن بیشتری نیاز است چون که توجهی به ضریب هم‌زمانی نمی‌شود.



شکل ۸: مثالی از جبرانسازی انفرادی

جبران‌سازی گروهی:

دستگاه‌هایی که به صورت گروهی نصب شده‌اند، به صورت جمعی جبران‌سازی می‌شوند. به جای خازن‌های مختلف کوچک یک خازن مناسب بزرگ نصب می‌شود.

کاربرد

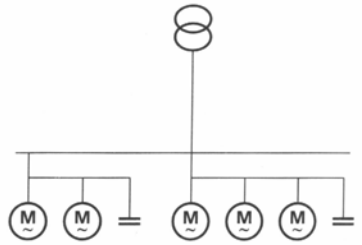
- ❑ برای مصارف سنگین سلفی در صورتی که با هم به کار گرفته شوند.

مزایا

- ❑ شبیه جبران‌سازی انفرادی ولی اقتصادی‌تر

معایب

- ❑ فقط برای مصرف‌کننده‌های گروهی که با هم کار می‌کنند قابل استفاده است.



شکل ۹: مثالی از جبران‌سازی گروهی

جبران‌سازی مرکزی:

کل جبران‌سازی به صورت متمرکز مثلاً در ورودی فشار ضعیف نصب می‌شود، بدین طریق تمام توان راکتیو مورد نیاز پوشش داده می‌شود. کل توان خازن به پله‌های متعدد تقسیم شده و به وسیله یک رگولاتور توان راکتیو از طریق کنتاکتورها، بسته به وضعیت بار به مدار وارد یا خارج می‌شوند.

این روش امروزه در بیشتر مواقع مورد توجه قرار می‌گیرد، چرا که جبران‌سازی مرکزی بدین طریق می‌تواند به آسانی تحت کنترل قرار گیرد. تنظیم‌کننده‌های راکتیو مدرن می‌توانند دائماً وضعیت کلیدها، ضریب توان و جریان اکتیو و راکتیو و همچنین هارمونیک‌های موجود در شبکه را تحت نظارت قرار دهند. به طور کلی با این روش به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمانی در تمام کارخانه توان خازنی کمتر نسبت به جبران‌سازی انفرادی یا گروهی نیاز است. در این روش جریان راکتیو سیم‌ها و کابل‌های به کار رفته در شبکه درونی از طریق جبران‌سازی کم نمی‌شوند. یعنی اگر سطح مقاطع کابل‌ها و سیم‌های بار به اندازهٔ کافی بزرگ باشد، دیگر مزیتی به شمار نمی‌رود.

کاربرد

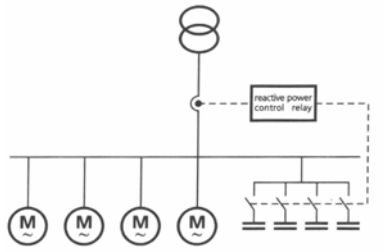
- ❑ درصورتی که مقاطع سیم‌ها و کابل‌های داخل کارخانه ایجاد مشکل نکنند همیشه قابل استفاده است.

مزایا

- ❑ کل سیستم مقابل دید بوده، به آسانی کنترل می‌شود.
- ❑ استفاده مفید از توان خازن نصب شده
- ❑ نصب ساده در اغلب اوقات
- ❑ مصرف کمتر خازن چون ضریب هم‌زمانی در نظر گرفته می‌شود
- ❑ در صورت وجود هارمونیک در شبکه، دارای مخارج مناسب‌تری است زیرا خازن‌ها آسان‌تر به سلف مجهز می‌شوند

معایب

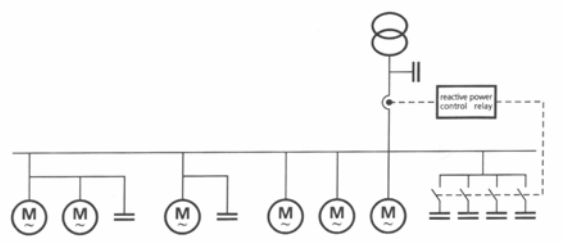
- ❑ بار داخلی شبکه کم نمی‌شود
- ❑ مخارج اضافی برای تنظیم اتوماتیک سیستم



شکل ۱۰: مثالی از جبران‌سازی متمرکز

جبران‌سازی مخلوط:

به دلیل اقتصادی اغلب مقرون به صرفه است که هر سه روش بالا را با یکدیگر استفاده نمود.



شکل ۱۱: مثالی از جبران‌سازی مخلوط

تعرفه‌های جریان:

برای مصرف‌کنندگان کوچک قوانین تعرفهٔ مشخصی از سوی شرکتهای برق منطقه‌ای اعلام می‌شود. در صورتی که برای مصرف‌کنندگان بزرگ قراردادهای مخصوصی بسته می‌شود.

در بیشتر این قراردادها مخارج برق از اجزاء زیر تشکیل شده است:

- توان اکتیو [kW] - اندازه‌گیری توسط کنتور ماکسی‌متر مثلاً ماکزیموم در هر ۱۵ دقیقه
- توان مؤثر [kWh] - اندازه‌گیری توسط کنتور اکتیو چند تعرفه (اغلب تعرفه روز و شب جداست).
- توان راکتیو [$kVArh$] - اندازه‌گیری توسط کنتور راکتیو چند تعرفه که بخشی از آن تعرفه روز و شب جدا دارد.

درحال حاضر زمانی مخارج انرژی راکتیوی محاسبه می‌شود که بار راکتیو بیشتر از ۵۰٪ بار اکتیو باشد. این مطابق ضریب توان ۰/۹ است. منظور این نیست که ضریب توان از ۰/۹ هرگز نباید بیشتر باشد. این ضریب توان به عنوان پایهٔ ضریب توان در متوسط ماهانه صدق می‌کند. در بعضی از مناطق برق منطقه‌ای ضرایب توان دیگری مثل ۰/۹ اعمال می‌نماید.

در انواع تعرفه‌ها، توان با kW محاسبه نمی‌شود بلکه با kVA محاسبه می‌گردد. در این صورت مخارج توان راکتیو در قیمت توان مستتر است. برای پایین آوردن مخارج در این مورد می‌بایستی سعی بر آن شود تا ضریب توان به ۱ افزایش یابد. کلاً باید از این نقطه نظر به موضوع نگاه کرد که در صورت انتخاب قدرت جبران‌سازی مناسب، از پرداخت مخارج اضافی جلوگیری می‌شود.

تخمین کلی:

در ادامهٔ درباره این موضوع بحث می‌شود که چطور توان جبران‌سازی مورد نیاز را می توان به دست آورد. بعضی مواقع اطمینان صد در صد به صحت نتیجه محاسباتی وجود ندارد. در این موارد می‌توان از روی تخمین بررسی کرد که نتیجهٔ محاسبه شده تا چه حد به حقیقت نزدیک است.

تا زمانی که مصرف‌کننده‌های نصب‌شده خارج از عرف معمولی نباشند. چنین تخمین‌هایی به طور کلی نزدیک به اعداد واقعی هستند.

جدول ۱: داده‌های تخمینی برای توان خازن مورد نیاز

نوع مصرف‌کننده	قدرت نامی خازن
موتورهای دارای جبران‌سازی انفرادی	۳۵-۴۰٪ توان موتور
ترانس‌های جبران‌سازی انفرادی	۲/۵٪ ظرفیت ترانس (در ترانس‌های قدیمی ۵٪)
جبران‌سازی مرکزی	۲۵-۳۳٪ توان ترانس با هدف $\cos\varphi = ۰/۹$ ۴۰-۵۰٪ توان ترانس با هدف $\cos\varphi = ۱$

تهیهٔ لیست از مصرف کنندگان:

در یک کارگاه جدید التاسیس یا در بخشی از کارگاه ابتدا تخمین کلی از بارها باید در دست باشد. جزئیات بیشتر را می‌توان با تهیه لیستی از مصرف‌کننده‌های نصب شده و مشخصات الکتریکی و ضرایب هم‌زمانی آنها به دست آورد.

این جبران‌سازی باید چنان طراحی و به اجرا در آید که در صورت نیاز به گسترش، مخارج زیادی را در برنگیرد. کابل‌ها و سیم‌ها و همچنین فیوزها برای این جبران‌سازی می‌بایستی چنان در نظر گرفته شوند که قابل توسعه باشند. به غیر از این می‌بایستی فضا برای خازن‌های اضافی نیز در نظر گرفته شود.

محاسبهٔ توان خازن مورد نیاز به وسیله اندازه‌گیری:

اندازه‌گیری شدت جریان و ضریب توان

آمپرمتر و دستگاه اندازه‌گیری توان اغلب در تابلو اصلی نصب شده‌اند. همچنین می‌توان از دستگاه‌های اندازه‌گیری چنگکی استفاده نمود. اندازه‌گیری‌های مورد نیاز در فیدر ورودی و یا فیدرهای خروجی پست اصلی انجام می‌پذیرد. اندازه‌گیری هم‌زمان ولتاژ شبکه دقت محاسبه را بهتر می‌نماید. البته می‌توان ولتاژ نامی را ۳۸۰ یا ۴۰۰ ولت در نظر گرفت.

از ولتاژ (U)، جریان ظاهری (I_s) و ضریب توان می‌توان توان اکتیو را محاسبه نمود.

$$P = \sqrt{3}.U.I_s.Cos\varphi.10^{-3}$$
$$[Kw] = [V] \,.\, [A]$$

در صورتی که $\cos\varphi$ مورد نظر مشخص باشد می‌توان با فرمول زیر توان خازن را محاسبه کرد. البته ساده‌تر است که فاکتور f از جدول ۲ استخراج شود و در توان موثر محاسبه شده ضرب شود.

$$Q_C = P.(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$
$$[VAr] = [W]$$

$$Q_C = P.f$$
$$[VAr] = [W]$$

مثال: اطلاعات برای

جریان ظاهری = ۲۴۸ آمپر

ضریب توان = ۰/۸۶

ضریب توان مطلوب = ۰/۹۲

ولتاژ = ۳۹۷ ولت

$$P = \sqrt{3} \times 397 \times 248 \times 0.86 \times 10^{-3}$$
$$P = 146.6kW$$

از جدول ۲، ضریب f برابر ۰/۱۷ است. پس مقدار خازن مورد نیاز:

$$Q_C = 146.6 \times 0.17 = 24.9kVAR$$

تذکر: اندازه‌گیری که در بالا بر اساس آنها محاسبات انجام گرفته مقادیر لحظه‌ای را به دست می‌دهند. میزان بار بسته به روز و فصل تغییرات شدیدی دارد. به همین جهت کسی باید اندازه‌گیری را انجام دهد که کارگاه یا کارخانه را به خوبی می‌شناسد. اندازه‌گیری‌های متعددی باید انجام پذیرد و به این نکته باید توجه کرد که مصرف‌کننده‌های نیازمند به جبران‌سازی (مصرف کننده‌های اصلی) در حال کار باشند. همچنین داده‌های اندازه‌گیری بایستی حتی‌الامکان سریعاً و هم‌زمان برای تمام دستگاه‌ها خوانده شود، تا این که با یک نوسان بار شدید ناگهانی اشتباهی در نتایج رخ ندهد.

اندازه‌گیری به وسیله ثبات اکتیو و راکتیو:

نتایج قابل قبول به وسیله دستگاه فوق حاصل می‌شود. این داده‌ها می‌توانند برای مدت زمان طولانی ثبت شوند. بدین طریق داده‌های پیک به دست می‌آید.

توان خازن طبق روال زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_C = Q_L - (P.\tan\varphi_2)$$
$$[kVAr][kVAr]$$

$Q_C =$ توان خازن مورد نیاز

$Q_L =$ توان راکتیو اندازه‌گیری شده

$P =$ توان موثر اندازه‌گیری شده

$\tan\varphi_2 =$ تانژانت زاویه متناظر $\cos\varphi$ مورد نظر (از جدول ۲ می توان این مقدار را برداشت کرد)

مثلا برای $\cos\varphi =$ ۰/۹۲، مقدار $\tan\varphi =$ ۰/۴۳ به دست می‌آید.

اندازه‌گیری از طریق خواندن کنتور:

کنتور توان اکتیو و راکتیو در ابتدای کار خوانده می‌شود. ۸ ساعت بعد، هر دو کنتور مجدداً خوانده می‌شوند. در صورتی که در این ۸ ساعت توقفی در کار ایجاد شده باشد، این مدت توقف باید به ۸ ساعت اضافه شود.

$$\frac{RM_2 - RM_1}{AM_2 - AM_1} = \tan\varphi$$

$RM_1 =$ مقدار اولیه کنتور راکتیو

$RM_2 =$ مقدار نهایی کنتور راکتیو

$AM_1 =$ مقدار اولیه کنتور اکتیو

$AM_2 =$ مقدار نهایی کنتور اکتیو

با حاصل به دست آمده برای $\tan\varphi$ و $\cos\varphi$ مورد نظر از جدول ۲ می توان فاکتور f را به دست آورد.

K نسبت ترانس جریان کنتور است.

$$Q_C = \frac{(AM_2 - AM_1)K}{8}.f$$

مثال: مقادیر زیر با خواندن کنتورها ثبت شده‌اند.

کنتور اکتیو (کیلووات ساعت) $AM_1 =$ ۱۱۵/۳

$AM_2 =$ ۱۲۴/۶

کنتور راکتیو (کیلووات ساعت) $RM_1 =$ ۳۱۱/۲

$RM_2 =$ ۳۲۱/۲

کنتورها با ترانس جریان با نسبت ۱۵۰ به ۵ آمپر ($150/5A$) کار می کنند، بنابراین ضریب تبدیل جریان $K =$ ۳۰ باید در نظر گرفته شود.

محاسبه: $$\tan\varphi = \frac{321.2 - 311.2}{124.6 - 115.3} = 1.08$$

برای رسیدن به ضریب توان ۰/۹۲ ضریب f از جدول برابر ۰/۶۵ به دست می‌آید،

مقدار خازن مورد نیاز $$Q_C = \frac{(124.6 - 115.3) \times 30}{8} \times 0.65 = 22.67 kVAr$$

جدول ۲: فاکتور f ($f = \tan\varphi_{actual} - \tan\varphi_{desired}$)

ضریب توان واقعی		ضریب توان مطلوب						
$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	۰,۸۰	۰,۸۵	۰,۹۰	۰,۹۲	۰,۹۵	۰,۹۸	۱,۰۰
۰,۳۰	۳,۱۸	۲,۴۳	۲,۳۶	۲,۷۰	۲,۷۵	۲,۸۵	۲,۹۸	۳,۱۸
۰,۳۲	۲,۹۶	۲,۲۱	۲,۳۴	۲,۴۸	۲,۵۳	۲,۶۳	۲,۷۶	۲,۹۶
۰,۳۴	۲,۷۷	۲,۰۲	۲,۱۵	۲,۲۸	۲,۳۴	۲,۴۴	۲,۵۶	۲,۷۷
۰,۳۶	۲,۵۹	۱,۸۴	۱,۹۷	۲,۱۰	۲,۱۷	۲,۲۶	۲,۳۹	۲,۵۹
۰,۳۸	۲,۴۳	۱,۶۸	۱,۸۱	۱,۹۵	۲,۰۱	۲,۱۱	۲,۲۳	۲,۴۳
۰,۴۰	۲,۲۹	۱,۵۴	۱,۶۷	۱,۸۱	۱,۸۷	۱,۹۶	۲,۰۹	۲,۲۹
۰,۴۲	۲,۱۶	۱,۴۱	۱,۵۴	۱,۶۸	۱,۷۳	۱,۸۳	۱,۹۶	۲,۱۶
۰,۴۴	۲,۰۴	۱,۲۹	۱,۴۲	۱,۵۶	۱,۶۱	۱,۷۱	۱,۸۴	۲,۰۴
۰,۴۶	۱,۹۳	۱,۱۸	۱,۳۱	۱,۴۵	۱,۵۰	۱,۶۰	۱,۷۳	۱,۹۳
۰,۴۸	۱,۸۳	۱,۰۸	۱,۲۱	۱,۳۴	۱,۴۰	۱,۵۰	۱,۶۲	۱,۸۳
۰,۵۰	۱,۷۳	۰,۹۸	۱,۱۱	۱,۲۵	۱,۳۱	۱,۴۰	۱,۵۳	۱,۷۳
۰,۵۲	۱,۶۴	۰,۸۹	۱,۰۲	۱,۱۶	۱,۲۲	۱,۳۱	۱,۴۴	۱,۶۴
۰,۵۴	۱,۵۶	۰,۸۱	۰,۹۴	۱,۰۷	۱,۱۳	۱,۲۳	۱,۳۶	۱,۵۶
۰,۵۶	۱,۴۸	۰,۷۳	۰,۸۶	۱,۰۰	۱,۰۵	۱,۱۵	۱,۲۸	۱,۴۸
۰,۵۸	۱,۴۰	۰,۶۵	۰,۷۸	۰,۹۲	۰,۹۸	۱,۰۸	۱,۲۰	۱,۴۰

۱,۳۳	**۰,۶۰**	۰,۵۸	۰,۷۱	۰,۸۵	۰,۹۱	۱,۰۰	۱,۱۳	۱,۳۳
۱,۳۰	**۰,۶۱**	۰,۵۵	۰,۶۸	۰,۸۱	۰,۸۷	۰,۹۷	۱,۱۰	۱,۳۰
۱,۲۷	**۰,۶۲**	۰,۵۲	۰,۶۵	۰,۷۸	۰,۸۴	۰,۹۴	۱,۰۶	**۱,۲۷**
۱,۲۳	**۰,۶۳**	۰,۴۸	۰,۶۱	۰,۷۵	۰,۸۱	۰,۹۰	۱,۰۳	۱,۲۳
۱,۲۰	**۰,۶۴**	۰,۴۵	۰,۵۸	۰,۷۲	۰,۷۷	۰,۸۷	۱,۰۰	۱,۲۰
۱,۱۱	**۰,۶۷**	۰,۳۶	۰,۴۹	۰,۶۳	**۰,۶۸**	۰,۷۸	۰,۹۰	۱,۱۱
۱,۰۸	**۰,۶۸**	۰,۳۳	۰,۴۶	۰,۵۹	۰,۶۵	۰,۷۵	۰,۸۸	۱,۰۸
۱,۰۵	**۰,۶۹**	۰,۳۰	۰,۴۳	۰,۵۶	۰,۶۲	۰,۷۲	۰,۸۵	۱,۰۵
۱,۰۲	**۰,۷۰**	۰,۲۷	۰,۴۰	۰,۵۴	۰,۵۹	۰,۶۹	۰,۸۲	۱,۰۲
۰,۹۹	**۰,۷۱**	۰,۲۴	۰,۳۷	۰,۵۱	۰,۵۷	۰,۶۶	۰,۷۹	۰,۹۹
۰,۹۶	**۰,۷۲**	۰,۲۱	۰,۳۴	۰,۴۸	۰,۵۴	۰,۶۴	۰,۷۶	۰,۹۶
۰,۹۴	**۰,۷۳**	۰,۱۹	۰,۳۲	۰,۴۵	۰,۵۱	۰,۶۱	۰,۷۳	۰,۹۴
۰,۹۱	**۰,۷۴**	۰,۱۶	۰,۲۹	۰,۴۲	۰,۴۸	۰,۵۸	۰,۷۱	۰,۹۱
۰,۸۸	**۰,۷۵**	۰,۱۳	۰,۲۶	۰,۴۰	۰,۴۶	۰,۵۵	۰,۶۸	۰,۸۸
۰,۸۶	**۰,۷۶**	۰,۱۱	۰,۲۴	۰,۳۷	۰,۴۳	۰,۵۳	۰,۶۵	۰,۸۶
۰,۸۳	**۰,۷۷**	۰,۰۸	۰,۲۱	۰,۳۴	۰,۴۰	۰,۵۰	۰,۶۳	۰,۸۳
۰,۸۰	**۰,۷۸**	۰,۰۵	۰,۱۸	۰,۳۲	۰,۳۸	۰,۴۷	۰,۶۰	۰,۸۰
۰,۷۸	**۰,۷۹**	۰,۰۳	۰,۱۶	۰,۲۹	۰,۳۵	۰,۴۵	۰,۵۷	۰,۷۸
۰,۷۵	**۰,۸۰**	–	۰,۱۳	۰,۷	۰,۳۲	۰,۴۲	۰,۵۵	۰,۷۵
۰,۷۲	**۰,۸۱**	–	۰,۱۰	۰,۲۴	۰,۳۰	۰,۴۰	۰,۵۲	۰,۷۲
۰,۷۰	**۰,۸۲**	–	۰,۰۸	۰,۲۱	۰,۲۷	۰,۳۷	۰,۴۹	۰,۷۰
۰,۶۷	**۰,۸۳**	–	۰,۰۵	۰,۱۹	۰,۲۵	۰,۳۴	۰,۴۷	۰,۶۷
۰,۶۵	**۰,۸۴**	–	۰,۰۳	۰,۱۶	۰,۲۲	۰,۳۲	۰,۴۴	۰,۶۵
۰,۶۲	**۰,۸۵**	–	–	۰,۱۴	۰,۱۹	۰,۲۹	۰,۴۲	۰,۶۲
۰,۵۹	**۰,۸۶**	–	–	۰,۱۱	**۰,۱۷**	۰,۲۶	۰,۳۹	۰,۵۹
۰,۵۷	**۰,۸۷**	–	–	۰,۰۸	۰,۱۴	۰,۲۴	۰,۳۶	۰,۵۷
۰,۵۴	**۰,۸۸**	–	–	۰,۰۶	۰,۱۱	۰,۲۱	۰,۳۴	۰,۵۴
۰,۵۱	**۰,۸۹**	–	–	۰,۰۳	۰,۰۹	۰,۱۸	۰,۳۱	۰,۵۱
۰,۴۸	**۰,۹۰**	–	–	–	۰,۰۶	۰,۱۶	۰,۲۸	۰,۴۸
۰,۴۶	**۰,۹۱**	–	–	–	۰,۰۳	۰,۱۳	۰,۲۵	۰,۴۶
۰,۴۳	**۰,۹۲**	–	–	–	–	۰,۱۰	۰,۲۲	۰,۴۳

۰,۴۰	**۰,۹۳**	-	-	-	-	۰,۰۷	۰,۱۹	۰,۴۰
۰,۳۶	**۰,۹۴**	-	-	-	-	۰,۰۳	۰,۱۶	۰,۳۶
۰,۳۳	**۰,۹۵**	-	-	-	-	-	۰,۱۳	۰,۳۳
۰,۲۹	**۰,۹۶**	-	-	-	-	-	۰,۰۹	۰,۲۹

محاسبه از طریق فیش برق:

این روش نسبتاً راحت است و با دقت خوبی می توان خازن را از صورت حساب ماهانه برق محاسبه کرد و در صورت عدم وجود تعطیلی کارخانه یا کارگاه در مدت محاسبه قبض، می‌توان از صورت حساب سالانه و یا ماهانه استفاده نمود. در صورت وقوع نوسانات فصلی مسلم است که باید از صورت حساب زمان پر باری کارخانه استفاده شود. در صورت محاسبه جداگانه تعرفه‌های روز و شب برای محاسبه نهایی از اطلاعات روز استفاده می‌شود. می توان چنین در نظر گرفت که توان خازن برای پوشش جریان راکتیو شب کافی است. در موارد خاصی که با برق شب که دارای قیمت مناسب‌تری است کار می‌شود نباید از اطلاعات شب صرف نظر کنیم.

تعرفه‌های قیمت انرژی:

در محاسبهٔ قیمت انرژی، حداکثر مصرف و انرژی اکتیو و انرژی راکتیو *به صورت مجزا* در نظر گرفته می‌شوند.
در بیشتر قراردادها حداکثر مصرف راکتیو برابر۵۰٪ مصرف اکتیو در نظر گرفته می‌شود. مصرف راکتیو در صورتی مشمول هزینه می‌گردد که بیش از ۵۰٪ مصرف اکتیو باشد که این مصرف متناظر ضریب توان ۰/۹ است. توصیه می‌شود که برای محاسبه، عدد بالاتری مثل ۰/۹۲ در نظر گرفته شود تا توان رزرو خازنی داشته باشیم.

$$\tan\varphi = \frac{19840}{17850} = 1.11$$

مثال برای محاسبه:
اطلاعات از صورت حساب برداشته شده:

- حداکثر مصرف ۹۹ کیلووات
- انرژی اکتیو مصرف شده ۱۷۸۲۰کیلووات
- انرژی راکتیو مصرف شده ۱۹۸۴۰ کیلووارساعت

برای $\tan\varphi$ برابر ۱/۱۱ از جدول ۲، ضریب توان برابر ۰/۶۷ و ضریب f برابر ۰/۶۸ به دست می‌آید.
توان خازن مورد نیاز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$99kW \times 0.68 = 67.32kVAr$$

در این مورد خازنی با توان ۷۵ کیلووار باید انتخاب شود که جهت در نظر گرفتن امکان توسعه کارخانه می‌توان مقدار ۱۰۰ کیلووار را انتخاب کرد.

تعرفه‌های میزان تقاضای انرژی:

در این حالت مبنای مصرف، حداکثر توان مصرفی مشتری در طول یک ماه خاص است. در صورتی که توان ظاهری و نه توان اکتیو مبنا باشد، توصیه می شود که میزان خازن را به نحوی انتخاب کنید که $\cos\varphi$ برابر ۱ شود.

مثال:

حداکثر توان اکتیو:	۱۰۴ کیلووات
ضریب توان فعلی ($\cos\varphi_1$)	۰/۶۲
ضریب توان مطلوب ($\cos\varphi_2$)	۱/۰۰
در نتیجه:	f = ۱/۲۷
توان خازنی مورد نیاز:	$104kW \times 1.27 = 132.08kVAr$

در اینجا از یک کنترل کنندهٔ توان راکتیو ۱۵۰ تا ۱۷۵ کیلوواری متصل به یک بانک خازنی استفاده می شود.

جبران سازی انفرادی لامپ‌های تخلیه‌ای:

جریان این گونه لامپ‌ها باید به وسیلهٔ چوک محدود گردد. از ترانس‌های نشتی بیشتر اوقات برای لامپ‌های فشارکم بخار سدیم استفاده می‌شود. همراه انواع دیگر لامپ‌های تخلیه‌ای از سلف سری به عنوان راکتور سری (ترانس نشتی) استفاده می‌شود. با استفاده از سلف به ضریب توان ۰/۵ و با استفاده از ترانس نشتی به ضریب توان ۰/۳ می‌رسیم.
بالاست الکترونیکی که برای لامپ‌های فلورسنت به کار می‌رود نیاز به جبران‌سازی ندارد.

توجه:

باید مد نظر داشت که اگر جریان غیر خطی از شبکه کشیده شود مخصوصاً در صورت افزایش تعداد لامپ‌ها، امکان رزونانس در اثر هارمونیک‌ها به وجود می‌آید. (به بخش هارمونیک‌ها مراجعه نمایید.)
برای جبران‌سازی بالاست می‌توان خازن‌های تک‌فاز را به صورت موازی یا سری نصب کرد.
در کلیدهای یک‌پل با یک لامپ یا کلیدهای سری با دو لامپ خازن باید به موازات لامپ قرار داده شود. ولتاژ نامی خازن ۲۳۰ ولت و هم‌اندازهٔ ولتاژ شبکه است.
خازن‌های موازی شبکه با امپدانس شبکه رزونانس ایجاد می‌کنند.
در لامپ‌های مهتابی دوبل از نظر اقتصادی یک خازن برای دو لامپ کافی است. در یک شاخه مدار سلفی است. در صورتی که در شاخهٔ دوم سلف سری به وسیلهٔ خازن جبران‌سازی شود. به خاطر افزایش ولتاژ که ناشی از اتصال سری خازن و سلف خازن باید برای یک ولتاژ نامی بالاتر انتخاب شود.

جدول انتخاب برای لامپ‌های تخلیه‌ای:

در جداول متن، خازن‌های مناسب برای انواع لامپ‌ها ارائه شده است.

توجه: چوک‌های کم‌تلفات با خازن‌های کم‌ظرفیت به صورت سری نصب می‌شوند. همان‌طور که در جدول نشان داده شده است. این اعداد بسته به تولید کننده‌های متفاوت متغیر است. در این بین همیشه عدد تعیین‌کننده، عدد خازنی است. (عددی که روی چوک نوشته می‌شود.)

متداول‌ترین خازن‌های سری برای چوک‌هایی با تلفات کم:

	۴۸۰ ولت / ۲/۷ میکروفاراد	۱۸ وات
۴۵۰ ولت / ۳/۵ میکروفاراد	۴۵۰ ولت / ۳/۴ میکروفاراد	۳۶ وات
۴۵۰ ولت / ۵/۴ میکروفاراد	۴۵۰ ولت / ۵/۳ میکروفاراد	۵۸ وات

نوع لامپ	ظرفیت لامپ بر حسب وات	ظرفیت خازن موازی بر حسب میکروفاراد	ظرفیت خازن سری بر حسب میکروفاراد
لامپ فلورسنت	۴ الی ۱۶	۲۳۰ ولت / ۲/۰	-
	۱۸ الی ۲۰	۲۳۰ ولت / ۴/۵	۴۵۰ ولت / ۲/۹
	۳۶ الی ۴۰	۲۳۰ ولت / ۴/۵	۴۵۰ ولت / ۳/۶
	۵۸ الی ۶۵	۲۳۰ ولت / ۷/۰	۴۵۰ ولت / ۵/۷
لامپ هالوژن بخار فلز	۳۵	۲۳۰ ولت / ۶/۰	-
	۷۰	۲۳۰ ولت / ۱۲/۰	-
	۱۵۰	۲۳۰ ولت / ۲۰/۰	-
	۲۵۰	۲۳۰ ولت / ۳۲/۰	-
	۴۰۰	۲۳۰ ولت / ۳۵/۰	-
	۱۰۰۰	۲۳۰ ولت / ۸۵/۰	-
	۲۰۰۰	۳۸۰ ولت / ۶۰/۰	-
	۳۵۰۰	۳۸۰ ولت / ۱۰۰/۰	-
لامپ بخار جیوهٔ فشار بالا	۵۰	۲۳۰ ولت / ۷/۰	-
	۸۰	۲۳۰ ولت / ۸/۰	-
	۱۲۵	۲۳۰ ولت / ۱۰/۰	-
	۲۵۰	۲۳۰ ولت / ۱۸/۰	-
	۴۰۰	۲۳۰ ولت / ۲۵/۰	-
	۷۰۰	۲۳۰ ولت / ۴۰/۰	-
	۱۰۰۰	۳۸۰ ولت / ۶۰/۰	-
لامپ سدیم کم فشار	۱۸	۲۳۰ ولت / ۵/۰	-
	۳۵	۲۳۰ ولت / ۲۰/۰	-

	۵۵	۲۳۰ ولت / ۲۰/۰	-
	۹۰	۲۳۰ ولت / ۲۵/۰	-
	۱۳۵	۲۳۰ ولت / ۴۵/۰	-
	۱۵۰	۲۳۰ ولت / ۲۰/۰	-
	۱۸۵	۲۳۰ ولت / ۴۰/۰	-
لامپ سدیم پر فشار	۵۰	۲۳۰ ولت / ۸/۰	-
	۷۰	۲۳۰ ولت / ۱۲/۰	-
	۱۰۰	۲۳۰ ولت / ۱۲/۰	-
	۱۵۰	۲۳۰ ولت / ۲۰/۰	-
	۲۵۰	۲۳۰ ولت / ۳۲/۰	-
	۴۰۰	۲۳۰ ولت / ۵۰/۰	-
	۱۰۰۰	۲۳۰ ولت / ۱۰۰/۰	-

جبران‌سازی گروهی لامپ‌های تخلیه‌ای:

در صورتی که لامپ‌های تخلیه‌ای زیادی هم‌زمان نصب باشند، می‌توان در یک تقسیم قرینه‌ای از خازن گروهی سه فاز با ولتاژ نامی ۴۴۰ ولت استفاده نمود.

توان خازن: $Q_C = n \times c \times 0.015$

Q_C = قدرت راکتیو بر حسب $kVAr$

n = تعداد لامپ‌ها

C = ظرفیت خازنی بر حسب μf برای هر لامپ

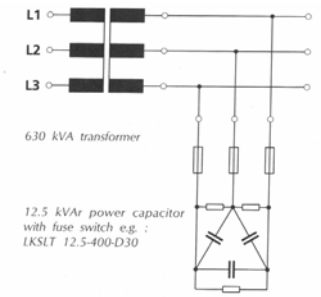
مثال: ۲۴ لامپ فلورسنت ۵۸ وات داریم: $24 \times 7\mu F \times 0.015 = 2.52kVAr$

جبران‌سازی تکی ترانسفورماتورها:

مقادیری که از سوی سازندگان برای مقدار خازن‌های جبران‌سازی ترانس، پیشنهاد می‌گردد یکسان نیست. به همین دلیل قبل از نصب یک چنین سیستم جبران‌سازی، مشاوره با پیشنهاد دهندگان توصیه می‌شود. ترانس‌های مدرن دارای ورقه‌های هسته‌ای هستند که برای تغییر میدان مغناطیسی احتیاج به توان کمی دارند. در صورت بالا بودن توان خازن، هنگام بی‌بار بودن ترانس امکان بروز اضافه ولتاژ های بزرگ وجود دارد. خازن‌هایی با فیوز قدرت داخلی برای اتصال مستقیم به ترمینال ترانس مناسب هستند فقط در هنگام اتصال خازن باید در نظر داشت که کابل اتصال خازن برای یک قدرت اتصال کوتاه مناسب باشد.

جدول ۳: جدول پیشنهادی انتخاب برای جبران‌سازی ترانس

قدرت ظاهری ترانس *kVA*	قدرت راکتیو *kVAr*
۱۰۰ الی ۱۶۰	۲/۵
۲۰۰ الی ۲۵۰	۵
۳۱۵ الی ۴۰۰	۷/۵
۵۰۰ الی ۶۳۰	۱۲/۵
۸۰۰	۱۵
۱۰۰۰	۲۰
۱۲۵۰	۲۵
۱۶۰۰	۳۵
۲۰۰۰	۴۰



شکل ۱۲: یک ترانس به همراه سیستم جبران‌سازی ثابت

توجه: نباید فیوزهای قدرت خازن‌های دارای فیوز قدرت داخلی زیر بار بیرون کشیده شوند زیرا به دلیل مصرف بار خازنی خالص، باعث تشکیل قوس الکتریکی می‌شود.
در صورت نیاز به قطع خازن از ترانس برق‌دار لازم است تا از کلید اتوماتیک به جای کلید فیوز استفاده شود.

جبران‌سازی انفرادی موتورها:

توان خازن بایستی حدوداً ۹۰٪ توان ظاهری موتور را در هنگام بی‌باری تأمین کند. توان خازنی مورد نیاز:

$$Q_C = 0.9 \times \sqrt{3} \times U \times I_0$$
[VAr] [V] [A]

جریان بی‌باری موتور $= I_0$

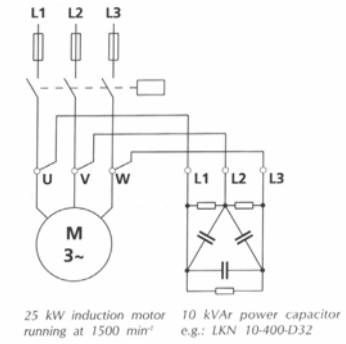
بدین وسیله در بار کامل ضریب توان ۰/۹ و در حالت بی باری ضریب توان بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۸ خواهد بود. برای موتورهای القایی با ۱۵۰۰ دور در دقیقه اعداد ارائه شده در جدول ۴ به کار می‌رود. برای موتورهای ۱۰۰۰ دور در دقیقه باید ۵٪ و با سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه ۱۵٪ به اعداد جدول ۴ اضافه شوند.

جدول ۴: قدرت جبران‌سازی برای جبران‌سازی انفرادی موتورها

قدرت موتور *kW*	قدرت راکتیو *kVAr*
۱ الی ۱/۹	۰/۵
۲ الی ۲/۹	۱
۳ الی ۳/۹	۱/۵
۴ الی ۴/۹	۲
۵ الی ۵/۹	۲/۵
۶ الی ۷/۹	۳
۸ الی ۱۰/۹	۴
۱۱ الی ۱۳/۹	۵
۱۴ الی ۱۷/۹	۶
۱۸ الی ۲۱/۹	۷/۵
۲۲ الی ۲۹/۹	۱۰
۳۰ الی ۳۹/۹	حدود ۴۰٪ قدرت موتور
۴۰ به بالا	حدود ۳۵٪ قدرت موتور

توجه: ماشین‌هایی که جبران‌سازی انفرادی شده‌اند و دارای خازنی هستند که به ترمینال‌های موتور متصل است توان خازن‌شان به هیچ وجه نباید بزرگ انتخاب شود. به ویژه در دستگاه‌هایی که دارای گشتاور ماند بالایی هستند و پس از خاموش‌شدن هنوز دوران می‌کنند.
خازنی که به صورت موازی با دستگاه قرار دارد می‌تواند موتور را مانند ژنراتور تحریک کند و به این وسیله ولتاژهای بالای خطرناک پدید می‌آید که در این صورت به احتمال قوی خساراتی به خازن و موتور وارد می‌کند.

جبران‌سازی انفرادی موتورها:
در ساده‌ترین فرم خازن مستقیماً به ترمینال‌های موتور متصل می‌شود. در این صورت می‌توان از حفاظت خازن صرف نظر کرد چون فیوز موتور از خازن حفاظت می‌کند. در صورتی که کلید حافظ موتور نصب شده باشد توصیه می‌شود که جریان آستانه قطع (*Trip*) کمتری انتخاب شود.



شکل ۱۳: سیستم جبران‌سازی ثابت برای موتور

جریان آستانه قطع (*Trip*) تقلیل یافته

$$I_{th} = \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \times I_N$$

I_{th} = جریان آستانه قطع جدید مورد استفاده

I_N = جریان نامی موتور (طبق پلاک مشخصات)

$\cos\varphi_1$ = طبق پلاک مشخصات

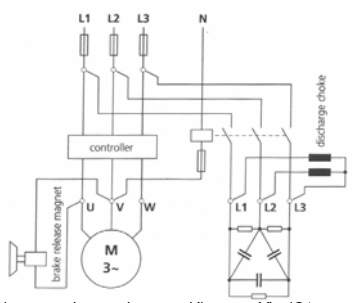
$\cos\varphi_2$ = ضریب توان با جبران‌سازی (حدود ۰/۹۵)

پس از قطع ولتاژ خازن‌ها مستقیماً به وسیلهٔ سیم‌پیچ‌های کم‌مقاومت مستقیماً تخلیه می‌شود لذا مقاومت‌های تخلیه زیاد ضروری نیستند.

جبران‌سازی انفرادی آسانسورها و بالابرها:

آسانسورها و بالابرها به تجهیزات ایمنی ویژه‌ای مجهز هستند: به عنوان مثال ترمز مغناطیسی که هنگام قطع برق به سرعت فعال می‌شود. این خازن که مستقیماً به صورت موازی با موتور نصب شده، احتمال دارد به دلیل انرژی باقی‌مانده در آن باعث تأخیر در عملکرد ترمز مغناطیسی شده و ایست با تأخیر صورت پذیرد.

به همین دلیل خازن‌ها می‌بایستی پیش از کلید نصب شوند. برای خازن می‌بایستی حفاظت جداگانه و تجهیزات تخلیهٔ سریع در نظر گرفت.

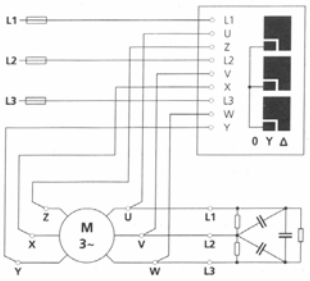


شکل ۱۴: موتور بالابر به همراه تجهیزات مورد نیاز

به وسیلهٔ اینترلاک باید از وصل مجدد خازن تا قبل از اتمام زمان تخلیه جلوگیری شود. به دلیل خاموش و روشن کردن زیاد و استهلاکی که از این طریق به وجود می‌آید توصیه می‌شود که خازن‌ها گروه‌بندی شده با کلیدهای الکترونیکی قطع و وصل گردند. خازن‌ها در هنگام عبور از صفر خاموش و روشن می‌شوند. بدین وسیله زمان عکس‌العمل در محدودهٔ هزارم ثانیه قرار دارد.

کلید های ستاره مثلث:

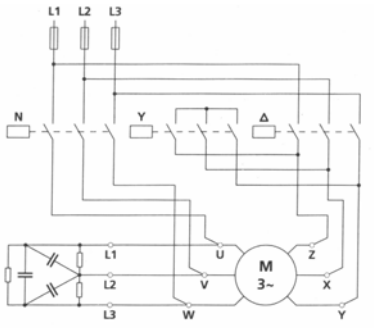
باید از کلیدهای ستاره مثلث دستی خاصی که برای جبران‌سازی منفرد موتورها طراحی شده‌اند، استفاده شود. در انتخاب کلیدهای ستاره - مثلث دستی برای موتورهایی که به وسیلهٔ خازن جبران‌سازی می‌شوند باید دقت گردد که کلیدی به کار رود تا هنگام تبدیل از ستاره به مثلث جرقه در کنتاکت‌ها ایجاد نشود. در غیر این صورت، در هنگام عبور از حالت ستاره به مثلث خازن شارژ شده با ولتاژ ستاره تحت ولتاژ مثلث قرار گرفته و جریان ضربه‌ای بسیار شدیدی ایجاد شده که باعث تخریب خازن و کلید می‌شود.



شکل ۱۵: نوع خاصی از کلید دستی ستاره مثلث برای جبران‌سازی انفرادی موتور

ترکیب کنتاکتور ستاره مثلث:

در صورت استفاده از ترکیب کنتاکتوری باید دقت شود تا در تبدیل از ستاره به مثلث، قطع و وصل سریع صورت نپذیرد، بنابراین کنتاکت‌های اصلی در هنگام تبدیل پیوسته وصل باقی بمانند. هنگام خاموش بودن موتور باید پل ستاره باز باقی بماند. خازن می‌تواند در قسمت خروجی حافظ شبکه یا در روی ترمینال‌های *W-V-U* موتور وصل شده باشد ولی به ترمینال‌های *Z-Y-X* نباید وصل شده باشد چرا که امکان ایجاد جرقه به وسیله پل ستاره پدید می‌آید.



شکل ۱۶: جبران‌سازی انفرادی موتور با راه‌اندازی ستاره مثلث کنتاکتوری

مهم:

توان خازن نصب‌شده نباید به هیچ وجه زیاد باشد. به ویژه هنگامی که دستگاه دارای اینرسی بار بزرگ بوده و بعد از خاموش کردن، دستگاه آزاد می‌گردد. خازن موازی می‌تواند دستگاه را به عنوان ژنراتور تحریک کند و ولتاژ خطرناک بالایی به وجود آید. از این طریق خساراتی به خازن و موتور وارد می‌شود به همین دلیل باید در هنگام قطع موتور از شبکه و در شرایط قطع از بسته شدن کنتاکتور ستاره جلوگیری کرد.

زمانی که دستگاه در حالت اتصال ستاره به عنوان ژنراتور تحریک شود باید انتظار ولتاژهای بالایی با دامنه به مراتب بزرگتر از آنچه در حالت مثلث پیش می‌آید را داشت.

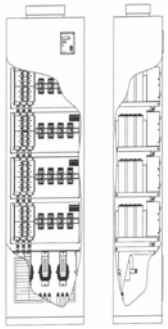
تجهیزات تنظیم توان راکتیو:

سیستم تنظیم توان راکتیو از اجزا زیر تشکیل شده است:

- تنظیم‌کنندهٔ توان راکتیو (رگولاتور)
- پله‌های خازنی که از طریق کلیدهای الکترونیکی یا کنتاکتور به کار گرفته می‌شوند.
- راکتورهای بلوک کنندهٔ هارمونیک (در صورت وجود)
- سلف‌های بلوک کننده فرکانس‌های رادیویی
- فیوزهای گروهی

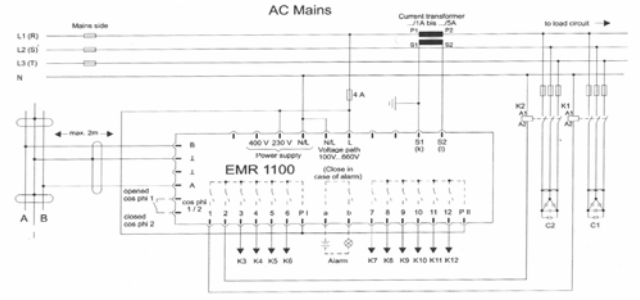
➢ سیستم خنک‌کننده به همراه فیلتر هوا و ترموستات برای سلف‌های با هسته هوایی ترموستات‌دار برای سیستم‌های مجهز به راکتور

این اجزاء یا روی یک صفحه مونتاژ یا در قسمت برق کارخانه در تابلو نصب می‌شود. تجهیزات تنظیم توان راکتیو مناسب نصب در شبکه‌هایی با توان راکتیو متغیر با زمان هستند. این خازن‌ها به صورت پله‌های مختلفی دسته‌بندی شده‌اند و به وسیله رگولاتور اتوماتیک توان راکتیو از طریق کنتاکتور یا کلیدهای الکترونیکی به تناسب بار موجود به مدار وارد یا خارج می‌شوند.



شکل ۱۷: مثالی از فرم مدولی سیستم اصلاح ضریب قدرت

کنترل بر جبران‌سازی مرکزی به راحتی امکان‌پذیر است. تجهیزات تنظیم توان مدرن دارای کنترل مداوم روی وضعیت کلیدها ضریب توان و جریان موثر و راکتیو و همچنین کنترل روی هارمونیک‌های موجود در شبکه هستند. در اغلب اوقات توان راکتیو کمتری از آنچه محاسبه شده مورد نیاز است.



شکل ۱۸: یک مدار نمونه با سیستم تصحیح ضریب توان

خازن‌های قدرت:

خازن‌های قدرت فراکوه با انواع LKI و یا LKT عاری از PCB بوده و دارای عایقی با خاصیت خود ترمیمی هستند. در صورتی که در اثر اضافه بار (مثلاً ولتاژ بالا) شکست الکتریکی رخ دهد کویل خود را ترمیم می‌کند. گذشته از این، خازن‌ها امکانات ایمنی اضافی مانند فیوز داخلی قابل اطمینانی را دارا هستند. فیوزی که در برابر اضافه فشار داخلی به عنوان عنصر حفاظتی عکس‌العمل نشان می‌دهد. برای به کارگیری خازن‌های قدرت در شبکه اصولاً سه عامل اهمیت دارند:

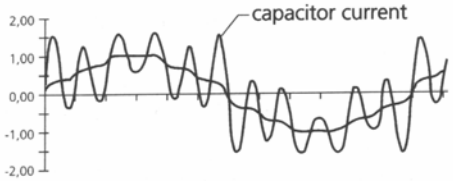
- میزان تحمل اضافه بار
- طول عمر بالا
- ایمنی بالا در بار زیاد و خرابی

خازن‌های قدرت دارای ساختاری با چگالی انرژی بالا هستند. در یک حجم یک لیتری امروزه حدود $۱۵\,kVAr$ توان راکتیو را می توان تولید کرد. این پیشرفت با به کارگیری عایق‌هایی با تلفات پایین و ضریب دی‌الکتریک بالا حاصل شده است. برای دست‌یابی به طول عمر بالا می‌بایستی تخلیه‌های جزئی محدود شوند. این تخلیه‌های جزئی، تخلیه‌های کوچکی هستند که در داخل دی‌الکتریک به وجود می آیند. برای محدود کردن این تخلیه‌های جزئی مطمئن‌ترین راه اشباع عایق با پر کننده‌ای مایع است.

این مایع به وسیله خواص شیمیایی خود تخلیه‌های جزئی را محدود می‌کند. روغن گیاهی پایدار شده که در خازن‌های LKT فراکوه به کار می‌رود، به صورت چشمگیری دارای این خواص است. این روغن غیرسمی بوده و برای محیط زیست مسأله‌ساز نیست. نقطهٔ اشتعال آن $۲۵۰\,^{\circ}C$ است. این مایع عملاً از آتش‌سوزی جلوگیری می‌نماید. در مقایسه با مایع‌های اشباع‌کنندهٔ دیگر که در خازن‌های قدیمی به کار می‌رفت (اصولاً روغنهای معدنی با نقطهٔ اشتعال $۱۳۰^{o}C$) این روغن غیر قابل اشتعال است.

ظرفیت جریان:

در شبکه با هارمونیک، احتمال پدید آمدن رزونانس همراه با اضافه ولتاژ وجود دارد و قبل از آن جریان مجاز شبکه را باید مد نظر داشت. مثلا اگر حدود ۷٪ هارمونیک مرتبهٔ ۱۱ وجود داشته باشد. ولتاژ ۷٪ افزایش می یابد ولی مقدار جریان موثر خازن ۱/۳۳ برابر جریان نامی خازن می‌گردد. بنابراین **اهمیت حداکثر اضافه جریان مجاز بیشتر از حداکثر اضافه جریان مجاز است**.



FRAKO تنها خازن‌های ۴۴۰ ولت را برای کار در شبکه‌های ۴۰۰ ولت استفاده می‌نماید. میزان ظرفیت جریانی آنها به شرح زیر است:

- تحمل دائمی دو برابر جریان نامی در ۴۰۰ ولت

- تحمل جریان ضربه‌ای با دامنهٔ ۳۰۰ برابر جریان نامی

ظرفیت ولتاژی:

خازن‌های FRAKO طبق VDE560 بخش ۴۱ استاندارد، EN 60831 بخش‌های ۱ و ۲ به صورت زیر قابل بارگذاری هستند.

ولتاژ نامی (ولت)	۴۴۰	۴۸۰	۵۷۰	۶۲۰
۸ ساعت در روز	۴۸۴	۵۲۸	۶۲۷	۶۸۲
۳۰ دقیقه در روز	۵۰۶	۵۵۲	۶۵۶	۷۱۳
۵ دقیقه	۵۲۸	۵۷۶	۶۸۴	۷۴۴
یک دقیقه	۵۷۲	۶۲۴	۷۴۱	۸۰۶

طول عمر:

اضافه ولتاژ، اضافه دما و هارمونیک‌ها طول عمر مورد انتظار را کوتاه می‌کنند. فقط افزایش دقت در تولید با کیفیت بالا و استفاده از مواد اولیه بسیار با کیفیت مانع از افزایش تلفات و تقلیل مقاومت عایقی و جریان مجاز خازن می‌گردند. خازن‌های تولیدی تحت آزمایش‌های طولانی مدت در شرایط ۱/۵ برابر ولتاژ نامی و $۶۰^{o}C$ درجهٔ حرارت محیط و هارمونیک شدید قرار می‌گیرد. نرخ خرابی خازن به وضوح کمتر از ۱٪ است. درصد خرابی نامحسوس است و تلفات در سطح پایینی ثابت می‌ماند.
FRAKO برای خازن‌های تولید خود طول عمری مناسب با حداکثر ۳٪ خرابی را اعلام می‌نماید. اما خازن‌های برگشتی و تمام نقایص تقبل می‌شود و طبق آمار این عدد کمتر از ۲۰۰ واحد در میلیون است. این مطابق با نرخ خرابی می‌باشد که بسیار کمتر از ۳٪ در ۲۰۰ هزار ساعت کار است.

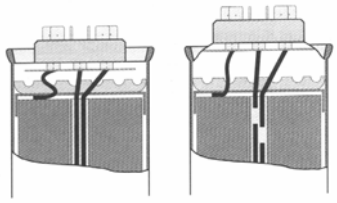
رفتار ایمن در پایان طول عمر:

مسلم است که اگر خازن تحت اضافه بار به پایان طول عمر خود نزدیک گردد باید ایمن باشد.
این ایمنی فقط در خازن‌هایی وجود دارد که دارای قطع کننده‌ای باشد که:

- در اثر فشار داخلی عمل کند
- خازن را از شبکه جدا کند

و به این وسیله مانع از تخریب پوسته خازن شود

به خاطر چگالی انرژی بالای خازن‌های مدرن، FRAKO گران‌ترین و موثرترین قطع‌کننده را به کار می‌برد که دارای درپوش خمیدهٔ قابل انعطاف است. بدنه آلومینیومی و درپوش آنها به هم نورد شده‌اند و با یک ماده الاستیک آب‌بندی می‌گردد. خازن‌های برگشت داده شده به دلیل آب بندی نبودن در سال‌های آخر حدود ۱۰ واحد در میلیون برابر ۰/۰۱٪ بوده است. پوشش دیافراگمی لبه‌داری که روی خازن است قسمت اتصال خازن را در حالت کار عادی نگه می‌دارد، در فشار حدود ۳ اتمسفر در داخل خازن، شروع به باد کردن می‌کند و تا حدود ۱۰ میلیمتر به بالا حرکت می‌کند. بیشتر مواقع سیم‌های خازن پس از ۵ میلیمتر حرکت درپوش، بدون جرقه مجدد قطع می‌شوند و خازن از شبکه جدا می‌شود. اطمینان در تولید در FRAKO به وسیله تست نمونه‌ای کنترل می‌شود. شرایط تست در IEC831، VDE 0560 قسمت ۴۱ مشخص شده است.



شکل ۱۹: عملکرد قطع‌کنندهٔ اضافه فشار در خازن‌های فراکوه

خازن‌های قدرت FRAKO پس از پایان طول عمر در اطرافشان تخریب به وجود نمی‌آورند.

رگولاتور توان راکتیو:

شکل ۲۰: رگولاتور EMR 1100

رگولاتورهای میکروپروسسوری RM 9612، EMR 1100، RM 9606 مسائل بغرنجی را حل می‌نماید و قابلیت‌های بیشتری نسبت به رگولاتورهای معمولی دارند. نوآوری این دستگاه‌ها در جهت پاسخگویی به نیازهای یک شبکه مدرن صنعتی است که به صورت‌های گوناگون قابل نصب است. دقت و حساسیت این دستگاه حتی برای شبکه‌های با هارمونیک بالا قابل توجه است. این دستگاه همچنین پاسخگوی نیاز شبکه‌هایی است که در آنها به طور مداوم یا ناگهانی جهت توان برعکس می‌شود و به شبکهٔ اصلی جریان تزریق می‌نمایند. تمامی اجزاء یک بانک خازنی توسط این رگولاتور کنترل شده و از ایجاد اضافه بار جلوگیری می‌کند که افزایش طول عمر تجهیزات را به همراه دارد.

جزئیات بیشتر مشخصات توان:

- اندازه‌گیری دقیق ضریب توان در شبکه‌های هارمونیک بالا در محدوده بار ۰/۰۲ تا ۵ آمپر در مدار اندازه‌گیری و کنترل ضریب توان که با دقت بالایی بر اساس هارمونیک پایه حتی در بار کم انجام می‌پذیرد.
- تثبیت ضریب توان به حداقل ضریب توان مطلوب و هم‌زمان جلوگیری از اضافه جبران‌سازی در بارهای کم که این خاصیت تنظیم، ثبت شده از سوی شرکت FRAKO است که با استفاده از ایجاد شکست در منحنی‌های مشخص به دست

می‌آید. این منحنی‌ها تعیین می‌نماید که در حالت بار طبیعی، شبکه برای رسیدن به ضریب توان مطلوب جبران‌سازی می‌شود و در بارهای کم از فوق جبران‌سازی جلوگیری می‌نماید.

- اندازه‌گیری و کنترل هارمونیک‌های ۵، ۷، ۱۱ و ۱۳ در شبکه‌های فشار ضعیف: به وسیله این کنترل، دستگاه به طور مرتب از کیفیت شبکه آگاه می‌شود و در هنگام افزایش دامنهٔ هارمونیک‌ها از مقدار خاصی هشدار صادر می‌نماید. بدین وسیله می‌توان به موقع از ایجاد اختلالات در شبکه و در مصرف کننده مطلع و اقدامات لازم را برای جلوگیری از آن به عمل آورد.
- رله اضافه جریان در جبران‌سازهای بدون راکتور: این عمل به عنوان حفاظت از اضافه بار در جبران‌سازی‌های بدون راکتور است و از وقوع رزونانس‌های هارمونیکی جلوگیری می‌کند. قطع جریان هنگامی به وجود می‌آید که اضافه‌بار بیش از ۷۵ ثانیه دوام داشته باشد. رلهٔ اضافه‌بار سریع‌تر از فیوز سری است، که تنها در حالت اتصال کوتاه به صورت مطمئن عمل می‌کند.
- تنظیم اتوماتیک تأخیر بر اساس توان مورد نیاز: به تغییر بار شدید بسیار سریع پاسخ داده می‌شود و به تغییر بار کند با سرعت کمتری پاسخ داده می‌شود. در ضمن اطمینان حاصل می‌شود که پله‌های خازنی که پس از قطع کاملاً **تخلیه** شده‌اند، به شبکه وصل می‌شوند. کلید زنی بر اساس تغییرات بار و با کمترین تعداد قطع و وصل و به صورت **ادواری** انجام می‌پذیرد. این نوع تنظیم ترکیبی ما را به سوی کمترین تعداد قطع و وصل سوق می‌دهد و **بدین وسیله کمترین استهلاک و طولانی‌ترین طول عمر به دست می‌آید**.
- هم‌زمان از وضعیت بحرانی شبکه جلوگیری می‌شود. بدین صورت که بر عکس روش قدیمی توان خازن هنگام تغییر شدید بار سریع، دقیق به میزان مورد نیاز تنظیم می‌شود.
- هنگام کاهش بار از جبران‌سازی اضافی طولانی ترانس‌های بی‌بار جلوگیری می‌شود.
- در شبکه‌هایی که دارای هارمونیک هستند، در کوتاه‌ترین زمان ممکن هارمونیک‌ها توسط فیلترها جذب شده و کاهش آنها تضمین می‌شود. بدین وسیله با اطمینان از افزایش دامنهٔ هارمونیک‌ها هنگام تغییرات شدید بار جلوگیری می‌شود.
- رله ولتاژ صفر و جریان صفر: این سیستم ایمنی، در هنگام قطع مدار ولتاژ یا جریان، تجهیزات جبران‌سازی را از شبکه جدا می‌کند. بدین وسیله در طی قطع کوتاه مدت ولتاژ از وصل تمامی خازن‌ها به ترانس بی‌بار جلوگیری می‌کند رگولاتور پس از برگشت ولتاژ، پله‌های خازن را مطابق با توان مورد نیاز مجدداً وصل می‌نماید.
- تنظیم توان راکتیو در مصرف‌کننده‌های دارای ژنراتور و با امکان بازگشت توان اکتیو: برای کار در این نوع شبکه‌ها رگولاتور به دستگاه اندازه‌گیری چهار ناحیه‌ای مجهز است. به غیر از این می‌توان دو مشخصهٔ کنترلی متفاوت برای حالت‌های مصرف و برگشت توان اکتیو به کار گرفته شود. بدین وسیله اطمینان حاصل می‌شود که در هنگام برگشت توان اضافه‌جبران‌سازی رخ ندهد و همچنین جریان راکتیو از شبکه کشیده نشود. فقط این خاصیت تنظیم ترکیبی از ایجاد مخارج راکتیو هنگام بازگشت جلوگیری می‌کند.
- پله ثابت برای جبران‌سازی مستقل از بار: می‌توان پله‌هایی را مشخص نمود تا در فرآیند تنظیم قرار نگیرند و تا زمانی که رگولاتور ولتاژ داشته باشد به شبکه متصل هستند. جمیع کنترل‌های حفاظتی مثل رله ولتاژ صفر یا رله جریان صفر یا رله اضافه جریان برای پله‌های ثابت برنامه‌ریزی شده فعال باقی می‌مانند.
- دو برنامه تنظیم جدا از هم که از طریق کنتاکتور خارجی می توانند انتخاب شوند. هر دو برنامه تنظیم می‌تواند با ضریب توان‌های مختلف و خطوط متفاوت برنامه‌ریزی می‌شوند. با تنظیم دو برنامهٔ مجزا می‌توان ضوابط وزارت نیرو برای جبران‌سازی بالا در روز و جبران‌سازی کم در شب را رعایت کرد.

راه‌اندازی و سرویس:

➢ تطبیق با شبکه و تجهیزات جبران‌سازی: راه‌اندازی بدین وسیله بسیار ساده‌تر می‌شود چون که رگولاتور این تطبیق را خود به خود انجام می‌دهد. بسته به اختیار نصاب است که به روی کدام فاز ترانس جریان را نصب کند و با چه پلاریته‌ای ترانس ولتاژ را به رگولاتور وصل نماید. وضعیت فاز و جهت جریان به وسیله رگولاتور در هنگام تنظیم خودکار انجام می‌شود. هم‌زمان توان پله‌های خازن اندازه‌گیری شده و کنتاکت‌هایی از رگولاتور که به خازنی متصل نیستند شناسایی و غیر فعال می‌شوند. در صورتی که اشتباهاتی در هنگام نصب بروز کرده باشد، رگولاتور اطلاعاتی از نوع اشتباه احتمالی به دست می‌دهد. پس از اضافه یا کم کردن پله‌های خازنی می‌بایستی اندازه‌گیری دوباره انجام شود تا بدین وسیله پله‌های خازنی جدیدی که اضافه یا کم شده‌اند را در پروسه خود وارد کند. اگر این کار انجام نشود بعد از چند روز رگولاتور متوجه شده و به طور خودکار پله‌های خازنی را به کار می‌گیرد.

اگر رگولاتور در هنگام کار متوجه یک پله خراب شود این پله را از پروسه تنظیم خارج کرده و آن‌را مشخص می‌نماید.

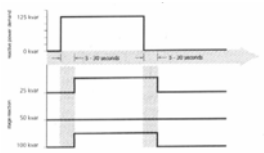
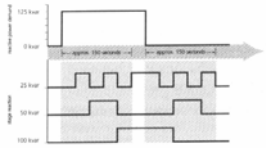
➢ نمایشگرها و اطلاعات حاصل از آنها: تمام مقادیر اندازه‌گیری شده توسط رگولاتور قابل مشاهده هستند. در هنگام کار ضریب توان دیده شده از طرف CT نشان داده می‌شود. به علاوه داده‌های ذیل قابل مشاهده‌اند.

- جریان ظاهری، اکتیو و راکتیو ورودی
- دامنه نسبی هارمونیک های ۵، ۷، ۱۱، و ۱۳ نسبت به ولتاژ تغذیه
- حداکثر مقادیر اضافه جریان، ضریب توان و اضافه جریان هارمونیکی در صورتی که از مقادیر تنظیم شده بیشتر شده باشند.

➢ شمارش و نمایش تعداد قطع و وصل کنتاکتور و نمایش پیغام وقتی که این مقدار از پیش تنظیم شده رسیده باشد.

کنتاکتورها هنگام وصل کردن خازن‌ها تحت فشار زیادی قرار دارند. کنتاکتورهایی که در حال خراب شدن هستند باعث جاری شدن جریان شارژ مجدد بسیار بزرگی می‌شوند و خرابی کنتاکت‌ها را نیز به وجود می‌آید. تعویض به موقع کنتاکتور می تواند طول عمر خازن‌ها را به طور محسوس افزایش دهد.

رگولاتور زمان صحیح تعویض کنتاکتور را به شما اطلاع می‌دهد و بدین وسیله از مخارج بیهوده جلوگیری می‌شود. برای مراقبت بهتر، کاربر می‌تواند تعداد قطع و وصل هر کنتاکتور را رؤیت نماید.

	
شکل ۲۲: روش تنظیم یک رگولاتور توان راکتیو مدرن مدل RM9606، RM9612، EMR1100	شکل ۲۱: روش تنظیم یک رگولاتور توان راکتیو معمولی با روش قدم به قدم

نشانگرها، پیغام‌ها و آلارم‌ها	اطلاعات	نحوهٔ آگاه‌سازی	وضعیت کنتاکت آلارم
ضریب توان حقیقی	نشانگر	صفحهٔ نمایش	-
جریان‌های اکتیو، راکتیو و ظاهری	نشانگر	صفحهٔ نمایش	-
هارمونیک‌های پنجم، هفتم، یازدهم و سیزدهم	نشانگر	صفحهٔ نمایش	-
هارمونیک‌های پنجم، هفتم، یازدهم و سیزدهم	آلارم	صفحهٔ نمایش و چراغ	بسته
اضافه جریان (قابل تنظیم از I_n ۱/۰۵ تا I_n ۳/۰)	آلارم	صفحهٔ نمایش و چراغ	بسته
ناکافی بودن ظرفیت خازن جهت رسیدن به ضریب توان تنظیم‌شده	آلارم	صفحهٔ نمایش و چراغ	بسته
تعداد قطع و وصل هر پله	نشانگر	صفحهٔ نمایش	-
تنظیم حداکثرتعداد قطع و وصل مجاز	آلارم	صفحهٔ نمایش و چراغ	بسته
ولتاژ صفر	آلارم	صفحهٔ نمایش	بسته
جریان صفر	پیغام	صفحهٔ نمایش	-
وصل نبودن خازن به رگولاتور	آلارم	صفحهٔ نمایش	بسته
تعداد پله‌های وصل	نشانگر	LED	-
بدون ولتاژ بودن	-	-	بسته

ترانس جریان:

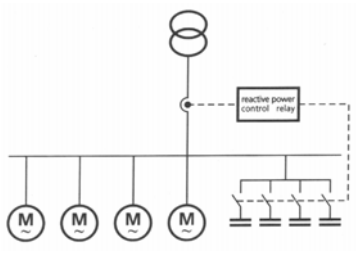
برای به کار اندازی یک رگولاتور توان راکتیو، نصب یک ترانس جریان ضروری است. این ترانس همراه با رگولاتور عرضه نمی‌شود ولی در صورت تقاضا از طرف مشتری تحویل می‌گردد. جریان اولیه ترانس از طریق میزان جریان مصرف کننده مشخص می‌شود. نصب این ترانس بسته به حداکثر جریان بار است و یا به عبارت دیگر بسته به میزان بار نصب شده ترانس است. مسیر جریان داخلی رگولاتور توان راکتیو برای ترانسی با ثانویه ۱/... الی ۵/... آمپر با توان ۵ ولت آمپر در کلاس ۳ طراحی شده است. در صورتی که دستگاههای جریان سنج به صورت سری با رگولاتور وصل شده باشد باید ترانسی با توان بالاتر به کار رود.

مصرف خود مسیر جریان رگولاتور برای ترانس جریانی با ثانویهٔ ۵ آمپر، حدود ۱/۸ ولت‌آمپر است. اگر با همان ترانس دستگاه‌های اندازه‌گیری دیگری به کار بروند، باید حتما هنگام نصب توان آنها در نظر گرفته شود. همچنین در کابل‌های ترانس تلفات پدید می‌آید و به تلفات در مسیرهای طولانی ترانس تا رگولاتور توان راکتیو باید توجه کرد.

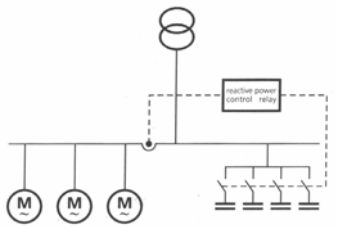
مصرف درونی کابل‌های ترانس:

اگر از ثانویهٔ ترانس جریان ۵ آمپر بگذرد، تلفات به صورت جدول زیر است:

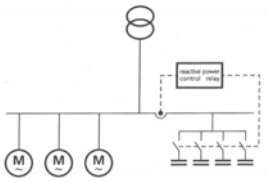
سطح مقطع (میلیمتر مربع)	تلفات در هر متر از سیم دو رشته (ولت آمپر)
۲/۵	۰/۳۶
۴/۰	۰/۲۲
۶/۰	۰/۱۵
۱۰/۰	۰/۰۹



شکل ۲۳: اتصال صحیح ترانس هم جریان مصرف‌کننده و هم جریان خازن را می‌بینند.



شکل ۲۴: **اشتباه!** ترانس فقط جریان مصرف‌کننده را دیده، تمامی پله‌ها وصل شده ولی دیگر قطع نمی‌شوند. امکان تنظیم اتوماتیک رگولاتور وجود ندارد.



شکل ۲۵: **اشتباه!** در این آرایش تنها جریان خازن از ترانس عبور می‌کند، در این حالت هیچ پله‌ای وصل نمی‌شود و رگولاتور پیغام *"I=0"* را نشان می‌دهد.

مهم: ترانس جریان باید در فازی اختیاری طوری چنان نصب شود که تمام جریان بار به همراه جریان خازن از آن بگذرد. (به تصاویر بالا دقت کنید.) ترمینال $S1(k)$ در سمت تغذیه و ترمینال $S2(I)$ در سمت مصرف کننده است.

احتیاط: هنگام قطع مسیر جریان در ترانس جریان ولتاژ بالا پدید می‌آید که می‌تواند ترانس را تخریب نماید. به همین دلیل قبل از باز کردن مدار ترانس در ترمینال‌های ترانس اتصال کوتاه به وجود بیاورید.

فیوزها و کابل‌ها:

برای اجرای عملیات نصب بایستی مقررات VDE 0100 و VDE 0105 و توصیه‌های عمومی وزارت نیرو و مقررات داخلی شرکت اجرا شوند. طبق بخش 41 - VDE 0560 واحدهای خازنی باید حداقل برای جریان دائمی معادل ۱/۳ جریان نامی مناسب باشد. جریانی که برای ولتاژ نامی با فرم سینوسی و فرکانس نامی محاسبه می‌گردد، با در نظر گرفتن تلرانس خازنی ۱/۱ C_n می‌تواند به حداکثر جریان مجاز تا ۱/۳۸ I_s برسد. این بار اضافی و همچنین جریان ضربه‌ای خازن‌ها هنگام انتخاب فیوزها و مقاطع کابل‌ها بایستی در نظر گرفته شود.

توجه: خازن‌های فراکوه اضافه‌باری معادل دو برابر جریان نامی در ۴۰۰ ولت را به صورت دائمی تحمل می‌کنند.

جدول ۵: فیوز و مقطع کابل ارتباطی بر اساس VDE0100، بخش ۴۳۰

۵۲۵ ولت / ۵۰ هرتز			۴۰۰ ولت / ۵۰ هرتز			۲۳۰ ولت / ۵۰ هرتز			توان (کیلووار)
سطح مقطع (میلیمتر مربع)	جریان فیوز (آمپر)	جریان (آمپر)	سطح مقطع (میلیمتر مربع)	جریان فیوز (آمپر)	جریان (آمپر)	سطح مقطع (میلیمتر مربع)	جریان فیوز (آمپر)	جریان (آمپر)	
۴×۱,۵	۱۰	۲,۷	۴×۱,۵	۱۰	۳,۶	۴×۱,۵	۱۰	۶,۳	۲,۵
۴×۱,۵	۱۰	۵,۵	۴×۱,۵	۱۰	۷,۲	۴×۲,۵	۲۰	۱۲,۶	۵
۴×۱,۵	۱۰	۶,۹	۴×۲,۵	۱۶	۹,۰	۴×۴	۲۵	۱۵,۷	۶,۲۵
۴×۲,۵	۱۶	۸,۲	۴×۲,۵	۱۶	۱۰,۸	۴×۶	۳۵	۱۸,۸	۷,۵
۴×۲,۵	۱۶	۱۱,۰	۴×۲,۵	۲۰	۱۴,۴	۴×۶	۳۵	۲۵,۱	۱۰
۴×۲,۵	۲۰	۱۳,۷	۴×۴	۲۵	۱۸,۰	۴×۱۰	۵۰	۳۱,۴	۱۲,۵
۴×۴	۲۵	۱۶,۵	۴×۶	۳۵	۲۱,۷	۴×۱۶	۶۳	۳۷,۷	۱۵
۴×۶	۳۵	۱۹,۲	۴×۶	۳۵	۲۵,۳	۴×۱۶	۶۳	۴۳,۹	۱۷,۵
۴×۶	۳۵	۲۲,۰	۴×۱۰	۵۰	۲۸,۹	۳×۲۵/۱۶	۸۰	۵۰,۲	۲۰
۴×۱۰	۵۰	۲۷,۵	۴×۱۰	۵۰	۳۶,۱	۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۶۲,۸	۲۵
۴×۱۰	۵۰	۳۰,۲	۴×۱۶	۶۳	۳۹,۷	۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۶۹,۰	۲۷,۵
۴×۱۰	۵۰	۳۳,۰	۴×۱۶	۶۳	۴۳,۳	۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۷۵,۳	۳۰
۴×۱۰	۵۰	۳۴,۴	۴×۱۶	۶۳	۴۵,۱	۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۷۸,۴	۳۱,۲۵
۴×۱۶	۶۳	۴۱,۲	۳×۲۵/۱۶	۸۰	۵۴,۱	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۹۴,۱	۳۷,۵
۴×۱۶	۶۳	۴۴,۰	۳×۲۵/۱۶	۸۰	۵۷,۷	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۱۰۰,۴	۴۰
۳×۲۵/۱۶	۸۰	۴۸,۱	۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۶۳,۱	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۱۰۹,۸	۴۳,۷۵

۳×۲۵/۱۶	۸۰	۴۹,۵	۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۶۵,۰	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۱۱۳,۰	۴۵
۳×۲۵/۱۶	۸۰	۵۵,۰	۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۷۲,۲	۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۲۵,۵	۵۰
۳×۲۵/۱۶	۸۰	۵۷,۷	۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۷۵,۸	۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۳۱,۸	۵۲,۵
۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۶۶,۰	۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۸۶,۸	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۵۰,۶	۶۰
۳×۳۵/۱۶	۱۰۰	۶۸,۷	۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۹۰,۲	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۵۶,۹	۶۲,۵
۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۷۴,۲	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۹۷,۴	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۶۹,۴	۶۷,۵
۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۷۵,۶	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۹۹,۲	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۷۲,۶	۶۸,۷۵
۳×۵۰/۲۵	۱۲۵	۸۲,۵	۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۱۰۸,۳	۳×۱۸۵/۹۵	۳۱۵	۱۸۸,۳	۷۵
۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۹۶,۲	۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۲۶,۳	۳×۱۸۵/۹۵	۳۱۵	۲۱۹,۶	۸۷,۵
۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۱۰۳,۱	۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۳۵,۳	۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۳۵,۳	۹۳,۷۵
۳×۷۰/۳۵	۱۶۰	۱۱۰,۰	۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۴۴,۳	۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۵۱,۰	۱۰۰
۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۲۳,۷	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۶۲,۴	۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۸۲,۴	۱۱۲,۵
۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۳۲,۰	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۷۳,۲	۲×۳×۱۲۰/۷۰	۵۰۰	۳۰۱,۲	۱۲۰
۳×۹۵/۵۰	۲۰۰	۱۳۷,۵	۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۸۰,۴	۲×۳×۱۲۰/۷۰	۵۰۰	۳۱۳,۸	۱۲۵
۳×۱۲۰/۷۰	۲۵۰	۱۶۵,۰	۳×۱۸۵/۹۵	۳۱۵	۲۱۶,۵	۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۳۷۶,۳	۱۵۰
۳×۱۸۵/۹۵	۳۱۵	۱۹۲,۵	۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۵۲,۶	۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۴۳۹,۳	۱۷۵
۳×۱۸۵/۹۵	۳۱۵	۲۱۹,۹	۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۸۸,۷	۲×۳×۲۴۰/۱۲۰	۸۰۰	۵۰۲,۰	۲۰۰
۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۴۷,۴	۲×۳×۱۲۰/۷۰	۵۰۰	۳۲۴,۸	–	–	–	۲۲۵
۲×۳×۹۵/۵۰	۴۰۰	۲۷۴,۹	۲×۳×۱۲۰/۷۰	۵۰۰	۳۶۰,۸	–	–	–	۲۵۰
۲×۳×۱۲۰/۷۰	۵۰۰	۳۰۲,۴	۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۳۹۶,۹	–	–	–	۲۷۵
۲×۳×۱۲۰/۷۰	۵۰۰	۳۲۹,۹	۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۴۳۳,۰	–	–	–	۳۰۰
۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۳۸۴,۹	۲×۳×۲۴۰/۱۲۰	۸۰۰	۵۰۵,۲	–	–	–	۳۵۰
۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۴۱۲,۴	۲×۳×۲۴۰/۱۲۰	۸۰۰	۵۴۱,۳	–	–	–	۳۷۵
۲×۳×۱۸۵/۹۵	۶۳۰	۴۳۹,۹	۲×۳×۲۴۰/۱۲۰	۸۰۰	۵۷۷,۴	–	–	–	۴۰۰

جدول ۶: قطر بیرونی سیم و کابل‌ها

H07RN-F قطر (میلی‌متر)	H05VV-F قطر (میلی‌متر)	NYCY/NYCWY قطر (میلی‌متر)	NYY قطر (میلی‌متر)	NYM قطر (میلی‌متر)	سطح مقطع هادی (میلی‌متر مربع)
۱۱,۵	۱۰,۵	۱۲,۰	۱۱,۰	۹,۰	۲×۱,۵
۱,۵	۱۲,۵	۱۴,۰	۱۳,۰	۱۰,۵	۲×۲,۵
۱۲,۵	۱۱,۰	۱۳,۰	۱۱,۰	۱۰,۰	۳×۱,۵
۱۴,۵	۱۳,۰	۱۴,۰	۱۳,۰	۱۱,۰	۳×۲,۵
۱۶,۰	–	۱۶,۰	۱۵,۰	۱۲,۵	۳×۴
۲۰,۰	–	۱۷,۰	۱۶,۰	۱۴,۰	۳×۶
۲۵,۵	–	۱۸,۰	۱۹,۰	۱۷,۰	۳×۱۰

۳×۱۶	۲۰,۰	۲۱,۰	۲۱,۰	–	۲۹,۰
۴×۱,۵	۱۰,۵	۱۳,۰	۱۴,۰	۱۲,۵	۱۳,۵
۴×۲,۵	۱۲,۰	۱۴,۰	۱۵,۰	۱۴,۰	۱۵,۵
۴×۴	۱۴,۰	۱۶,۰	۱۷,۰	–	۱۸,۰
۴×۶	۱۵,۰	۱۷,۰	۱۸,۰	–	۲۲,۰
۴×۱۰	۱۸,۰	۲۰,۰	۲۰,۰	–	۲۸,۰
۴×۱۶	۲۳,۰	۲۳,۰	۲۳,۰	–	۳۲,۰
۴×۲۵	۲۷,۵	۲۷,۰	۲۸,۰	–	۳۷,۰
۴×۳۵	۳۱,۰	۳۰,۰	۲۹,۰	–	۴۲,۰
۴×۵۰	–	۳۵,۰	۳۴,۰	–	۴۸,۰
۴×۷۰	–	۴۰,۰	۳۷,۰	–	۵۴,۰
۴×۹۵	–	۴۵,۰	۴۲,۰	–	۶۰,۰
۴×۱۲۰	–	۵۰,۰	۴۷,۰	–	–
۴×۱۵۰	–	۵۳,۰	۵۲,۰	–	–
۴×۱۸۵	–	۶۰,۰	۶۰,۰	–	–
۴×۲۴۰	–	۷۱,۰	۷۰,۰	–	–
۵×۱,۵	۱۱,۰	۱۳,۵	۱۵,۰	۱۳,۵	۱۵,۰
۵×۲,۵	۱۳,۰	۱۵,۰	۱۷,۰	۱۵,۵	۱۷,۰
۵×۴	۱۵,۰	۱۶,۵	۱۸,۰	–	۱۹,۰
۵×۶	۱۸,۰	۱۹,۰	۲۰,۰	–	۲۴,۰
۵×۱۰	۲۰,۰	۲۱,۰	–	–	۳۰,۰
۵×۱۶	۲۴,۰	۲۳,۰	–	۳۵,۰	–
۷×۱,۵	–	۱۳,۵	–	–	–
۱۰×۱,۵	–	۱۷,۰	–	–	–
۱۲×۱,۵	–	۱۷,۵	–	–	–
۱۴×۱,۵	–	۱۸,۰	–	–	–
۱۶×۱,۵	–	۱۹,۰	–	–	–
۲۴×۱,۵	–	۲۳,۰	–	–	–

راهنمای جدول:

NYM: کابل سبک با روکش پلاستیکی، NYY: کابل با روکش پلاستیکی، NYCY: کابل با روکش پلاستیکی و هادی هم‌مرکز، NYCYW: کابل با روکش پلاستیکی و هادی هم‌مرکز موجی، H05VV-F: کابل انعطاف پذیر معمولی با روکش لاستیکی، H07RN-F: کابل انعطاف‌پذیر سنگین با روکش لاستیکی

جدول ۷: سیم‌ها و کابل‌ها بر طبق چرخش یا پیچش کابل‌ها

زاویهٔ خمش	قطر خارجی کابل (میلی‌متر)	P_g	واحد متریک دنده‌ها
۱۹,۰	۶,۵ الی ۱۰,۵	۱۱	M ۱۶×۱,۵
۲۱,۰	۸,۰ الی ۱۲,۵	۱۳,۵	-
۲۳,۰	۱۰,۰ الی ۱۵,۰	۱۶	M ۲۰×۱,۵
۲۹,۰	۱۲,۰ الی ۲۰,۰	۲۱	M ۲۵×۱,۵
۳۸,۰	۱۹,۰ الی ۲۶,۵	۲۹	M ۳۲×۱,۵
۴۸,۰	۲۹,۰ الی ۳۴,۰	۳۶	M ۴۰×۱,۵
۵۵,۰	۳۴,۰ الی ۴۱,۰	۴۲	-
۶۰,۰	۴۰,۰ الی ۴۵,۰	۴۸	M ۵۰×۱,۵

نوع حفاظت:

برای علائم نوع حفاظت طبق DIN 40050 یا این که DIN 34/VDE0530 دو حرف و یک عدد دو رقمی به کار می‌رود. IP مخفف **حفاظت بین المللی** یک عدد دو رقمی است که رقم اول حفاظت در برابر مواد جامد و رقم دوم حفاظت در برابر مواد مایع است. معمولی‌ترین اختصارات در جدول زیر آمده است:

جدول ۸: مفهوم علائم برای انواع حفاظت

نوع حفاظت	ایمنی در برابر تماس	ایمنی در برابر تماس اشیا خارجی	آب
IP00	هیچ	هیچ	هیچ
IP10	در برابر تماس اتفاقی و یا اشتباهی	دارای قطر بیش از ۵۰ میلی‌متر	هیچ
IP20	با انگشت و یا اشیایی که حداکثر ۸۰ میلی‌متر طول داشته باشند	دارای قطر بیش از ۲۰ میلی‌متر	هیچ
IP30	با ابزارآلات و یا سیم های دارای ضخامت بیش از ۲/۵ میلی‌متر	دارای قطر بیش از ۱ میلی‌متر	هیچ
IP40	با سیم‌ها یا نوارهای دارای ضخامت بیش از ۱ میلی‌متر	دارای قطر بیش از ۱ میلی‌متر	هیچ
IP41	با سیم‌ها یا نوارهایی که دارای ضخامت بیش از ۱ میلی‌متر	دارای قطر بیش از ۱ میلی‌متر	در برابر قطرات آبی که به صورت عمودی می‌چکد
IP54	ایمنی کامل	نشستن گرد و خاک	برابر پاشیدن آب از تمام جهات
IP65	ایمنی کامل	ورود گرد	پاشیدن شدید آب در دریای پرتلاطم

فرمول‌های محاسبه برای خازن:

خازن تک‌فاز: $Q_C = C.V^2.2\pi.f_n$

مثال: خازن μf ۸۳ با ولتاژ ۴۰۰ ولت در فرکانس ۵۰ هرتز

$$0.000083 \times 400^2 \times 314.16 = 4.172 kVAr$$

خازن سه فاز: $Q_C = C.3.V^2.2\pi.f_n$

مثال: خازن μF ۳۳۲ × ۳ با ولتاژ ۴۰۰ ولت در ۵۰ هرتز

$$0.0000332 \times 3 \times 400^2 \times 314.16 = 50 kVAr$$

جریان فاز خازن $I = \frac{Q_C}{V.\sqrt{3}}$

مثال: ۲۵ کیلووار در ولتاژ ۴۰۰ ولت

$$25000/\left(400 \times \sqrt{3}\right) = 36A$$

ردیف فرکانس رزونانس f_r و ضریب سلف (p) خازن‌های سلف دار $F_r = f_n\sqrt{\frac{1}{p}}$

مثال: $p =$ ٪۷ در شبکه ۵۰ هرتز

$$f_r = 50 \times \sqrt{\frac{1}{0.07}} = 189Hz$$

توان خازن سه‌فاز در حالت چوک‌دار $Q_C = \frac{C.3.V^2.2\pi.f_n}{1-p}$

مثال: $3 \times 332\mu F$ در ۴۰۰ ولت ۵۰ هرتز با سلف $p =$ ٪۷

$$0.000332 \times 3 \times 400^2 \times 314.16/\left(1-0.07\right) = 53.8 kVAr$$

ضریب توان و محاسبه $\cos\varphi$ و $\tan\varphi$:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \text{ یا } \cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\tan^2\varphi}} \text{ یا } \cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{Q}{P}\right)^2}}$$

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P} \quad \text{یا} \quad \tan\varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi} - 1} \quad \text{یا} \quad \tan\varphi = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{P}{S}\right)^2} - 1}$$

راهنما:

V = ولتاژ بر حسب ولت	Q_C = قدرت جبران‌سازی بر حسب وار
I = جریان برحسب آمپر	C = ظرفیت خازن برحسب فاراد
f_n = فرکانس شبکه برحسب هرتز	P = توان اکتیو برحسب وات
f_r = فرکانس رزونانس برحسب هرتز	S = توان ظاهری برحسب ولت‌آمپر
p = ضریب سلف برحسب درصد	Q = توان راکتیو برحسب وار

هارمونیک چیست؟

در شبکه‌های مدرن فشار ضعیف مصرف‌کنندگان زیادی وجود دارند که از شبکه، جریان غیر سینوسی می‌کشند. این جریان‌ها به دلیل وجود امپدانس شبکه باعث ایجاد افت ولتاژ می‌گردند. افتی که باعث تغییر شکل ولتاژ سینوسی شبکه می‌شود. این آثار طبق بسط فوریه می‌توانند به هارمونیک پایه (اصلی) و تک‌تک هارمونیک‌ها تجزیه شوند. فرکانس‌های هارمونیک مضرب صحیحی از فرکانس پایه هستند و با حرف n یا v مشخص می‌شوند. مثال:

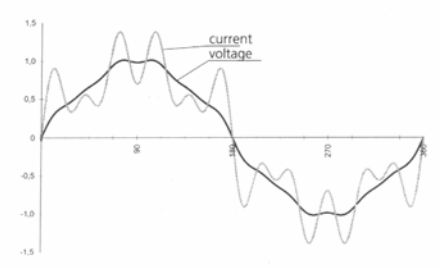
(فرکانس شبکه = ۵۰ هرتز $\Longleftarrow$ فرکانس هارمونیک پنجم = ۲۵۰ هرتز)

مصرف‌کنندگان خطی عمدتاً عبارتند از:

- مقاومت‌های اهمی (بخاری مقاومتی، لامپ‌های رشته‌ای)
- موتورهای سه فاز
- خازن‌ها

مصرف‌کنندگان غیر خطی (مولدین هارمونیک) عمدتاً عبارتند از:

- ترانسفورماتورها
- بوبین‌ها
- یکسو کننده‌ها
- مبدل‌های AC/DC و DC/DC به خصوص موتورهای القایی و مدارهای کنترل دور
- کوره‌های با قوس الکتریکی و القایی، دستگاه جوش
- دستگاه‌های UPS
- منابع تغذیه سوییچینگ تک‌فاز در مصرف‌کننده‌های مدرن الکترونیکی مانند تلویزیون، ویدئو، کامپیوتر، مونیتور، چاپگر، فاکس، بالاست الکترونیکی، چراغ‌های کم مصرف



٪۵ هارمونیک پنجم
٪۴ هارمونیک مرتبهٔ هفتم
٪۲٫۵ هارمونیک مرتبهٔ یازدهم

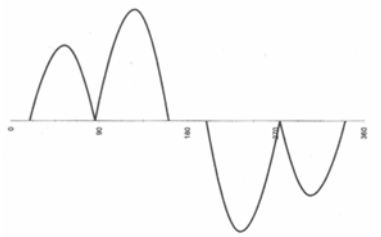
شکل ۲۶: جریان و ولتاژ شبکه

هارمونیک‌ها نه فقط در شبکه‌های صنعتی بلکه به طور روز افزون در مصارف خانگی تولید می‌شوند. از تولید کننده‌های هارمونیک عمدتاً هارمونیک‌های فرد به شبکه تزریق می‌شوند. به همین دلیل اصولاً هارمونیک‌های ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ پدید می‌آیند.

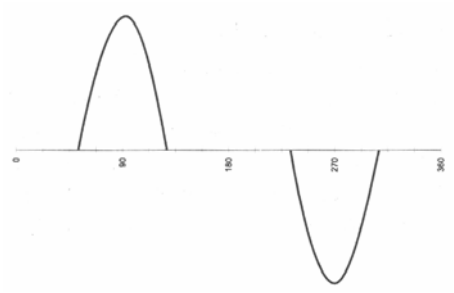
هارمونیک چطور به وجود می‌آید؟

- در شبکه‌های فشار ضعیف داخلی به خصوص وقتی محرک‌های تحت کنترل در محل نصب هستند.
- در هر خانه، در هر تلویزیون، کامپیوتر، چراغ‌های کم‌مصرف با بالاست‌های الکترونیکی.

به دلیل تعداد زیاد مصرف‌کنندگان این گونه بارها، جریان‌های هم‌فاز آنها در ساعات شب در بعضی از شبکه‌های ولتاژ، رزونانس پدید می‌آید.



شکل ۲۷: جریان کشیده شده از شبکه به وسیلهٔ یک مبدل موتور القایی



شکل ۲۸: جریان یکسو ساز قدرت

پیش از نصب سیستم جبران‌ساز دامنهٔ هارمونیک‌ها چقدر است؟

الف) در شبکه فشار ضعیف داخلی

بسته به توان یکسو ساز و مبدل نصب شده است. وقتی به عنوان مثال یکسو ساز ۶ پالسه با توان نامی ۵۰٪ توان ترانس نصب شده باشد، تقریباً:

۴٪ هارمونیک پنجم (۲۵۰ هرتز)

۳٪ هارمونیک هفتم (۳۵۰ هرتز) داریم.

معمولاً مبدل‌های کوچک غیر متصل به هم در یک شبکه نصب می‌شوند. به دلیل فازهای مختلف جریان‌های تک‌تک مبدل‌ها، هارمونیک کلی ایجاد شده در شبکه اندک است.

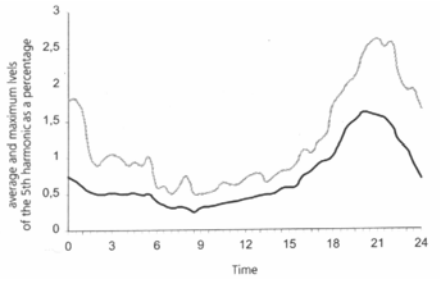
مثلا اگر تعدادی مبدل با توان حدود ۲۵٪ توان نامی ترانس نصب باشند. هارمونیک‌های زیر به وجود می‌آیند.

- ۱ تا ۱/۵ درصد هارمونیک پنجم
- ۰/۷ تا ۱ درصد هارمونیک هفتم

این اعداد برای محاسبات تقریبی توصیه می‌شوند و با این اطلاعات می‌توان تعیین کرد که آیا دستگاه جبران‌سازی با فیلتر لازم است یا خیر.

ب) در شبکهٔ فشار متوسط

امروزه شبکه‌ها از هارمونیک‌های ایجاد شده به وسیله لوازم خانگی مانند تلویزیون بیشتر از تولید کننده‌های صنعتی، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. چیزی که در طول روز در هارمونیک‌ها مشخص می‌گردد.



شکل ۲۹: متوسط و حداکثر مقدار هارمونیک پنجم

مقدار هارمونیک در شبکه با ولتاژ متوسط یک شهر در روز کاری:
مقدار متوسط و حداکثر یک ردیف اندازه‌گیری از سال ۱۹۸۵ تا سال ۱۹۸۷ در کشور آلمان به انجام رسیده است. مطمئناً این اعداد امروزه افزایش یافته‌اند. بالا بودن این مقدار در شب در اثر تعداد زیاد تلویزیون و دیگر مصرف‌کنندگان خانگی است.
در مناطق پر جمعیت هارمونیک ولتاژ شبکه فشار متوسط در ساعات شب بیش از ۴٪ (۲۵۰ هرتز) و تا حدود ۱/۵٪ (۳۵۰ هرتز) افزایش پیدا می‌کند. هارمونیک‌های بالا اصولاً قابل صرف نظر هستند و مقدار آنها به طور محدود قابل پیش‌بینی است.

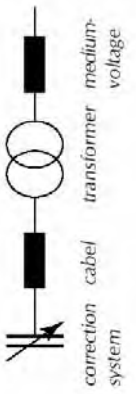
تأثیر جبران‌سازی در شبکه دارای هارمونیک چیست؟

تجهیزات جبران‌سازی بدون سلف با امپدانس شبکه یک مدار نوسان تولید می‌کند. برای فرکانس رزونانس یک فرمول کلی وجود دارد.

$$f_r = 50Hz \times \sqrt{\frac{S_K}{Q_C}}$$

S_K = قدرت اتصال کوتاه در نقطه اتصال جبران‌سازی

Q_C = توان جبران‌سازی



قدرت اتصال کوتاه S_K در نقطه جبران‌سازی

- اصولا به وسیله ترانس مشخص می‌شود (S_n / U_k)
- حدود ۱۰ درصد به وسیله امپدانس شبکه ولتاژ متوسط کاهش می‌یابد
- می تواند شدیداً به وسیله کابل‌های بلند بین ترانس و جبران‌سازی کاهش یابد

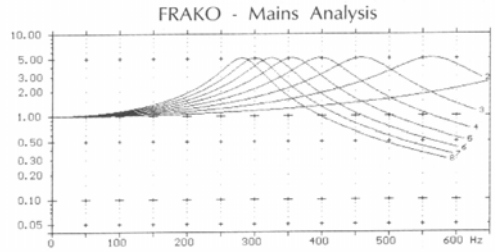
مثال:

- ترانس ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر و $U_k = 6\%$
- قدرت اتصال کوتاه شبکه فشار متوسط ۱۵۰ مگاولت آمپر و $S_K \approx 12.6MVA$
- قدرت جبران‌سازی ۴۰۰ کیلووار در ۸ پله بدون راکتور

قدرت خازن (Q_C) (کیلووار)	فرکانس رزونانس (f_r) (هرتز)
۱۰۰	۵۶۲
۲۵۰	۳۵۵
۲۵۰	۲۸۱

هنگام اتصال پله‌های جبران‌سازی فرکانس رزونانس شبکه f_r شدیداً تغییر می‌نماید و بیشتر اوقات نزدیک به فرکانس هارمونیک اصلی شبکه است.

در صورتی که رزونانس داخلی یک مدار نوسان نزدیکی یکی از هارمونیک‌های موجود در شبکه باشد، باید انتظار داشت که ولتاژ هارمونیکی افزایش یابد. تحت شرایطی می‌توان آنها را در ضریب کیفیت شبکه (در شبکه‌های صنعتی ۵ تا ۱۰) ضرب کرد.



شکل ۳۰: ضریب تقویت هارمونیک‌های ولتاژ در یک سیستم جبران‌سازی بدون راکتور

رزونانس‌های خطرناک شبکه چه زمانی می‌توانند پدید آیند؟

بر اساس دیاگرام موجود می‌توان حدس زد که آیا مشکلات رزونانسی با هارمونیک می‌توانند پدید آیند یا خیر و برای این موضوع قواعد سادهٔ زیر کافی هستند:

۱) اگر فرکانس رزونانس:

- ۱۰٪ بیشتر یا کمتر از فرکانس هارمونیک موجود در شبکه باشد. این فرکانس رزونانس در یک شبکه با کیفیت بالا (مثلا عصرها و شب ها) تا یک ضریب بزرگتر از ۴ تقویت می‌شود.
- ۲۰٪ بیشتر از فرکانس هارمونیک موجود در شبکه باشد. در یک شبکه با کیفیت بالا و با ضریبی تا ۲/۵ درصد تقویت

می‌شود.

- ۳۰٪ بالای فرکانس هارمونیک موجود در شبکه باشد به مقدار کم در حدود ۱/۷ تقویت می‌شود.

۲) در شبکه‌ای که بدون مولد هارمونیک باشد ولی هارمونیک از شبکهٔ فشار متوسط وارد می‌شود:

- با فرکانس رزونانس زیر ۴۰۰ هرتز ازدیاد دامنهٔ هارمونیک هفتم
- با فرکانس رزونانس کمتر از ۳۰۰ هرتز ازدیاد شدید دامنه هارمونیک پنجم پدید آید

آرایش شبکه چه تأثیری بر روی مسایل هارمونیک دارد؟

قدرت اتصال کوتاه شبکه تعیین کننده فرکانس رزونانس است و در تولید کننده‌های هارمونیکی، دامنهٔ ولتاژ هارمونیکی را تعیین می‌کند.

- قدرت اندک اتصال کوتاه شبکه در محل جبران‌سازی مشکل‌ساز است.
- همچنین تغییرات قدرت اتصال کوتاه شبکه ناشی از کلیدزنی مشکل‌ساز است.

مثال: در کارخانه‌های بزرگ، پست‌های فشار ضعیف برای قابلیت اطمینان بیشتر توزیع انرژی به صورت حلقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت قدرت اتصال کوتاه بسیار زیاد است.

معمولاً در سیستم‌های بزرگ جبران‌سازی و در شرایط کار یکسوسازهای بسیار پرقدرت مسائل رزونانس پدید نمی‌آید. در این حالت فرکانس رزونانس بزرگ است و عبور جریان هارمونیکی از شبکه فشار متوسط افت ولتاژ کمی ایجاد می‌نماید. در صورت باز شدن حلقه تغذیه مثلاً به منظور تعمیرات قدرت اتصال کوتاه شدیداً کاهش می‌یابد و حتی امکان افت فرکانس رزونانس به زیر ۳۰۰ هرتز وجود دارد.

اضافه‌ولتاژ و اضافه‌جریان تجهیزات جبران‌سازی بدون سلف:

هنگام پدید آمدن رزونانس مقدار مؤثر ولتاژ شبکه افزایش ناچیزی می‌یابد ولی مقدار موثر جریان خازن شدیداً افزایش می‌یابد. در حالت رزونانس با هارمونیک پنجم مقدار موثردامنه هارمونیک تا ۱۵٪ افزایش می‌یابد. بنابراین:

- مقدار مؤثر ولتاژ شبکه حدود ۱٪
- مقدار پیک ولتاژ حدود ۱۰٪ الی ۱۵٪ بسته به اختلاف فازها
- جریان موثر خازن ۲۵٪

افزایش می‌یابد.

با رزونانس در هارمونیک یازدهم، مقدار موثر دامنه هارمونیک تا ۱۰٪ می‌تواند افزایش یابد و مقدار موثر ولتاژ حدود ۵٪ و مقدار پیک ولتاژ حدود ۶٪ تا ۵۰٪ و جریان موثر خازن ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

بنابراین اضافه‌بار جریان در خازن یکی از مشخصات مهم کیفیت خازن است.

در شبکه ۴۰۰ ولت، خازنی با ولتاژ نامی ۴۴۰ ولت کاملاً مناسب است. چنین خازنی تا ۲ برابر جریان نامی قابل بارگذاری است.

در صورتی که امکان وقوع رزونانس وجود داشته باشد ولی احتمالش کم باشد چه باید کرد؟

امروزه این مطلب در بخش بزرگی از تجهیزات جبران‌سازی مطرح است.

- در شبکهٔ داخلی مولد هارمونیک وجود ندارد و در شبکهٔ ولتاژ متوسط نیز هارمونیک دیده نمی‌شود ولی فرکانس رزونانس زیر ۴۰۰ هرتز است.
- در شبکهٔ ولتاژ متوسط هارمونیک وجود دارد و امکان کاهش فرکانس رزونانس با تغییر در توپولوژی شبکهٔ فشار متوسط، (در هنگام بازدیدهای ادواری به منظور نگهداری و کنترل) به کمتر از ۴۰۰ هرتز وجود دارد.
- برنامه‌ریزی شده است که بعدا تجهیزات نیمه‌هادی در شبکه نصب گردد.

- برای حفاظت از تجهیزاتی که دارای راکتور نیستند در قبال وقوع احتمالی رزونانس دستگاه مراقبت شبکه EMA1101 مناسب است. این دستگاه مراقبت شبکه را در سه‌فاز تحت نظر دارد و در صورتی که حد هارمونیک تا حد خطرناکی افزایش یابند تجهیزات را قطع می‌نماید و هنگامی که این خطر برطرف شد دستگاه ها را مجدداً وصل می‌کند. مقادیر حداکثر در این دوره ثبت شده و می‌توان بعداً از طریق خط انتقال به اطلاعات آنها دست یافت. در شبکه‌هایی که بار متقارن دارند می‌توان از دستگاه تنظیم راکتیو EMR1100 استفاده نمود این دستگاه پدیدهٔ رزونانس را کنترل می‌کند. رگولاتور EMR1100 هارمونیک ولتاژ یک فاز را اندازه‌گیری کرده و جریان مؤثر خازنی ناشی از آنها را محاسبه کرده و زمانی که از مقدار از پیش تنظیم شده بیشتر گردد، دستگاه قطع شده و با کاهش دامنه هارمونیک‌ها دستگاه مجدداً وصل می‌گردد. در چنین مواردی اغلب تجهیزات جبران‌سازی که قابلیت افزایش راکتور را دارند استفاده می‌شود.

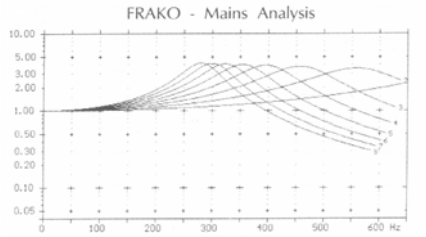
تجهیزات جبران‌سازی در شبکه‌های دارای هارمونیک

بهترین اطلاعات درباره نحوه کار یک کارگاه و وضعیت کاری آن با روش زیر به دست می‌آید:

- اندازه‌گیری هارمونیک ولتاژ و جریان در طول چند روز بدون جبران‌سازی
- محاسبه تئوری رفتار رزونانسی در شبکه

در شبکه اندازه‌گیری شده انتظار حد هارمونیک زیر با جبران‌سازی چنین است:
مقادیر حداکثر اندازه‌گیری شده قبل از جبران‌سازی ضرب در فاکتور رزونانس از آنالیز شبکه

مثال: یک شبکه فشار ضعیف متوسط با ترانس ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر داریم. تابلوهای اصلی کلید از طریق دو کابل موازی ۲۰ متری به ترانس متصل هستند. (مطابق امپدانس یک کابل ۱۰ متری) به عنوان بار، فقط بار اهمی در نظر گرفته می‌شود زیرا به عنوان مثال موتورهای آسنکرون هیچ اثری بر کاهش هارمونیک‌ها ندارند. وقتی بانک خازنی ۴۰۰ کیلووار در مدار باشد، هارمونیک پنجم سه برابر می‌گردد. با ۲۵۰ کیلووار هارمونیک هفتم تقریباً ۴ برابر می‌شود. در ساعات روز در شبکه دارای میرایی بالا این فاکتورها کاهش می‌یابد. شب ها و در آخر هفته ضریب افزایش هارمونیک ۷ می‌تواند بزرگتر گردد.



شکل ۳۱: افزایش دامنه هارمونیک‌ها بر حسب پله‌های خازنی

اقداماتی برای جلوگیری از پدید آمدن رزونانس:

هنگام نصب تجهیزات جبران‌سازی، اگر در صورت وقوع رزونانس اضافه‌ولتاژهای هارمونیکی با دامنهٔ بزرگتر از:

۴٪ هارمونیک مرتبه سوم (۱۵۰ هرتز)

۵٪ هارمونیک مرتبه پنجم (۲۵۰ هرتز)

۴٪ هارمونیک مرتبه هفتم (۳۵۰ هرتز)

۳٪ هارمونیک مرتبه یازدهم (۵۵۰ هرتز)

۱٪ هارمونیک مرتبه سیزدهم (۶۵۰ هرتز)

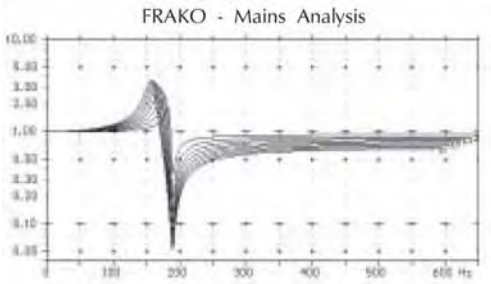
امکان پدید آمدن داشته باشند، امکان بروز اغتشاش شدیدی در شبکهٔ فشار ضعیف وجود دارد، از قبیل:

- مشکلاتی در کامپیوتر و ماشین‌های CNC
- خسارت به تجهیزات الکترونیک قدرت مثل یکسوسازها و مبدل‌ها
- عملکرد غیر قابل کنترل کلیدهای قدرت و فیوزها
- قطع شدن تجهیزات جبران‌سازی بدون راکتور
- افزایش ولتاژ در شبکه
- افزایش تلفات جریان فوکو در ترانس‌ها و موتورهای القایی

در صورتی که مقدار تک‌تک هارمونیک‌های (قبل از جبران‌سازی) بیش از ۱/۵٪ (هارمونیک ۷ و بالاتر) و یا به ۲٪ (هارمونیک ۵) باشد و هرگاه فرکانس رزونانس شبکه در نزدیکی این هارمونیک‌ها قرار گیرد باید انتظار داشت که این مقادیر به وسیلهٔ رزونانس افزایش یابند.

برای حفظ ایمنی شبکه فشار ضعیف بایستی در چنین مواردی بدون استثناء تجهیزات جبران‌سازی مجهز به راکتور نصب شود.

راکتور فرکانس رزونانس را به کمتر از ۲۵۰ هرتز کاهش می‌دهد. تمام هارمونیک‌های مرتبهٔ بالاتر تضعیف می‌شوند.



شکل ۳۲: میرایی ولتاژهای هارمونیک در ارتباط با مراحل جبران‌سازی با سلف

یک خازن راکتوردار، مجموعه‌ای است از مدار خازن و فیلتر که فرکانس رزونانس آن به وسیله قرار دادن مدار فیلتر انتخاب می‌شود. بدین وسیله این ترکیب برای تمام فرکانس‌های بالاتر از فرکانس رزونانس مدار به صورت سلفی تأثیر می‌گذارد. رزونانس‌های بین خازن و امپدانس شبکه امکان‌پذیر نمی‌گردد. یک تجهیزات چوک‌دار بخشی از هارمونیک را جذب می‌کنند. برای جلوگیری از اضافه‌بار ناشی از هارمونیک پنجم در شبکه اصولاً فرکانس رزونانس چوک و خازن را در حد ۱۸۹ هرتز و پایین‌تر از آن قرار می‌دهند.

این چوک یا طبق فرکانس رزونانس خازن و چوک (f_r) طبقه‌بندی می‌شود و یا براساس افت ولتاژ نسبی p .

هر دو عدد طبق فرمول پایین با هم در ارتباط می‌باشند:

$$f_c = 50Hz \times \sqrt{\frac{1}{p}}$$

مثال:

$$p = 0.07(7\%) \Rightarrow f_r = 189Hz$$

امپدانس خازن‌های دارای سلف با ۲۵۰ هرتز به حدود ضریب x کوچکتر است تا امپدانس خازن بدون سلف برای هارمونیک پنجم تجهیزات جبران‌سازی چوک‌دار دارای

- حالت جذب کردن با $2x > 1$
- حالت بلوک کردن با $x < 1$

در حالت جذب کردن شدیدتر می‌بایستی ۲۵۰ هرتز حداکثر مجاز محدود باشد برای اینکه سلف فیلتر بار اضافی نداشته باشد.

$p =$ ٪۵/۷	$f_r =$ ۲۱۰ Hz	$x =$ ۲/۴	$\Rightarrow$	$u250_{\max} =$ ٪۴
$p =$ ٪۷	$f_r =$ ۱۸۹ Hz	$x =$ ۱/۳۳	$\Rightarrow$	$u250_{\max} =$ ٪۵
$p =$ ٪۸	$f_r =$ ۱۷۷ Hz	$x =$ ۱/۰	$\Rightarrow$	$u250_{\max} =$ ٪۵
$p =$ ٪۱۳/۵	$f_r =$ ۱۳۶ Hz	$x =$ ۰/۴۲	$\Rightarrow$	$u250_{\max} =$ ٪۵

مثال:

در صورتی که ولتاژ هارمونیک پنجم ۴٪ ولتاژ شبکه باشد، تجهیزات جبران‌سازی چوک‌دار برای هارمونیک پنجم چنین جذب می‌کند.

در ۷٪ چوک	$4\% \times 5 \times 1.33 = 0.27 I_n$ (عدد ۵ به منظور تبدیل فرکانس ۵۰ به ۲۵۰ هرتز می باشد.)
در ۵/۷٪ چوک	$4\% \times 5 \times 2.4 = 0.48 I_n$ (عدد ۵ به منظور تبدیل فرکانس ۵۰ به ۲۵۰ هرتز می باشد.)
در ۱۳/۵٪ چوک	$4\% \times 5 \times 0.42 = 0.08 I_n$ (عدد ۵ به منظور تبدیل فرکانس ۵۰ به ۲۵۰ هرتز می باشد.)

اصولاً هنگام انتخاب تجهیزات جبران‌سازی چوک‌دار به نکات زیر باید توجه کرد.

- مجاز نیست خازن‌های با سلف یا بدون سلف در شبکه فشار ضعیف به صورت موازی با هم به کار رفته شوند.
- در به کارگیری فیلترهای موازی با ضرایب سلف متفاوت (p) ممکن است به دلیل وجود تفاوت در مشخصات فیلترها در مقادیر زیاد باید دقیقاً آنالیز شود.
- در صورتی که موضوع مربوط به شبکه‌های فشار ضعیفی که ارتباط الکتریکی غیرمستقیم دارند، باشد، بسته به احتیاج می‌توان مستقلاً با خازن بدون سلف و یا با سلف جبران‌سازی انجام داد.
- نصب فیلتر باید با قوانین EVU مطابقت داشته باشد.

نظارت بر سیستم‌های تصحیح ضریب توان در محیط‌های صنعتی:

نگهداری و مراقبت صحیح از تجهیزات تصحیح ضریب توان بعد از نصب به اندازهٔ خود برنامه‌ریزی و طراحی قبل از آن اهمیت دارد. این تجهیزات معمولاً به دست فراموشی سپرده می‌شوند و کاربر باید بداند که کنتاکتورهای خازنی به مرور فرسوده می‌شوند ولی معمولاً تا زمان خرابی کنتاکتورها و خسارات احتمالی بعدی به این نکته توجه نمی‌شود. **کنتاکتورها در زمان قطع و وصل خازن‌ها تحت فشار شدید قرار دارند.** کنتاکت‌های خورده شده باعث می‌شوند در زمان قطع و وصل خازن‌ها جریان زیادی کشیده شود که باعث خرابی بیشتر می‌شود. تعویض به موقع کنتاکت‌ها تأثیر زیادی در طول عمر سیستم تصحیح ضریب توان دارد. شمارنده‌های تعداد قطع و وصل‌ها که در رگولاتورها تعبیه شده است، زمان مناسب برای تعویض کنتاکت‌ها را نشان می‌دهد و به این ترتیب در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌کند.

تغییرات شبکه نیز باعث ایجاد آشفتگی‌هایی در سیستم فشار ضعیف می‌شود. هدف از سیستم نظارت بر شبکه شناسایی این تغییرات در مراحل اولیه است، قبل از اینکه قطعاتی از سیستم از کار بیفتد. تمام پارامترهای مؤثر در امنیت و قابلیت اطمینان سیستم فشار ضعیف و فشار متوسط مانند دمای قطعات حساس، میزان مصرف توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند.

وقتی مقدار هارمونیک بزرگ باشد و نیاز به توان راکتیو کوچک است، چه کار باید کرد؟

اصولاً در چنین مواردی راه‌حل‌های متفاوتی برای محدود کردن جریان‌های هارمونیکی تولید شده مصرف‌کننده‌های مولد هارمونیک وجود دارد.

معروف‌ترین این روش‌ها به کارگیری:

- فیلتر پاسیو متعدد (هماهنگ شده) یا
- تغذیهٔ بارهای حساس و مولدهای هارمونیک از ترانسفورماتورهای مجزا

است.

این راه‌حل‌ها دو نقطه ضعف دارد:

- هزینهٔ بالای تطابق مجدد سیستم با تغییرات شبکه که ناشی از عدم کاربرد تجهیزات اولیه
- به کارگیری عملی این راه‌حل‌ها در تأسیسات از پیش نصب‌شده بسیار مشکل است. اغلب به کارگیری خازن‌های بدون چوک در شبکه‌های دارای هارمونیک باعث ایجاد هارمونیک‌های بالا می‌شوند.

بهترین راه‌حل به کارگیری فیلترهای قدرت فراکوه است که مقرون به صرفه هستند.

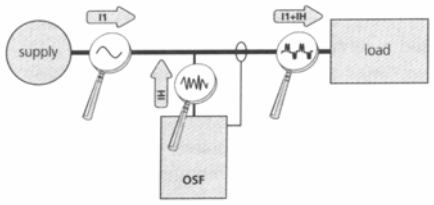
در صورت بروز مسائلی مانند:

- دامنه‌های بزرگ هارمونیک ۳، ۹، و ۱۵ و جریان سیم زمین
- لزوم نگه داشتن دامنهٔ هارمونیک‌های فشار متوسط در حد مجاز به وسیله فیلترهای تنظیم شده
- نیاز کم به توان راکتیو و جریان هارمونیک بالا مثلاً بخش بزرگی از ماشین‌های القایی که به وسیله سیستم سوییچینگ قدرت تغذیه می‌شوند.

راه حل بهینه برای مشکلات فوق، فیلتر اکتیو OSF یا ترکیبی از تجهیزات فیلتردار فراکوه است. مزیت فیلتر اکتیو در این است که هنگام توسعه تجهیزات مصرف‌کننده، جبران‌سازی به طور مؤثر انجام می‌شود. به دلیل انعطاف‌پذیری فیلترهای اکتیو فراکوه می‌توان از مقدار مورد نیاز انتخاب شود و مازاد نیاز به دلیل گسترش تجهیزات می‌تواند هر زمان به وسیله اضافه کردن اجزاء دیگر انجام پذیرد.

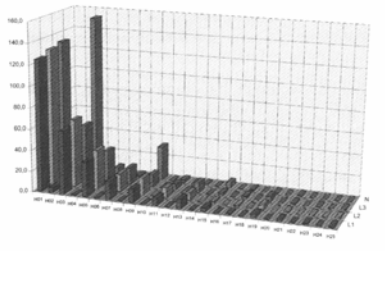
اصول کار فیلترهای اکتیو:

فیلتر اکتیوی که به صورت موازی به تولیدکنندهٔ هارمونیک متصل است جریان هارمونیکی که به وسیله مصرف کننده غیرخطی ایجاد شده تجزیه می‌کند و جریان جبران‌سازی با فاز مخالف را تزریق می‌کند یا تمام طیف هارمونیک های ۲ تا ۲۵ و یا هارمونیک های انتخاب شده و بدین وسیله جریانهای هارمونیک در محل اتصال در چهارچوب مفروضی کاملا خنثی می‌گردند.



ترکیب فیلتر هارمونیک و هارمونیک مصرف‌کننده همانند یک بار خطی برای شبکه است. باری که جریان سینوسی مصرف

می‌کند. مراحل نصب کاملا ساده است؛ فقط باید یک تغذیه سه فاز با سیم نول و یا بدون سیم نول موجود باشد و مبدل‌های جریان باید در ورودی مصرف کننده غیر خطی نصب شود.



مقادیر هارمونیک‌ها در همان شبکه (با استفاده از فیلتر)

مقادیر هارمونیک‌ها (بدون استفاده از فیلتر)

کاربرد:

نمونهٔ کاربردها عبارتند از:

- شبکهٔ فشار ضعیف با سیستم‌های سوییچینگ قدرت متعدد که به صورت محدود جریان‌های هارمونیک را به شبکهٔ فشار ضعیف با بار سنگین تزریق کند. مانند کارخانه‌های دور از پست با کابل اختصاصی
- محرک‌های سوییچینگ قدرت مدرن با تزریق هارمونیک بالا که فقط احتیاج به جریان راکتیو کم دارند. در یک شبکه ولتاژ پایین با ترانس ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر و با به کارگیری موتورهای القایی زیاد احتیاج به یک تنظیم‌کنندهٔ توان راکتیو با توان نامی ۴۰۰ کیلووار دارد. با به کارگیری مبدل‌های مدرن نیاز حدود ۱۰۰ کیلووار است.
- در شبکه‌های ولتاژ پایین با مقدار هارمونیک ۳ بالا به دلیل مصرف‌کننده‌های یک فاز این شبکه‌های ولتاژ پایین یک جریان سیم نول بالایی دارند که باید در یک بار متقارن، تقریباً صفر آمپر باشد. به دلیل بار الکترونیکی در مجاورت بارهای اهمی نامتعادل جریان‌های هارمونیک سه فاز روی سیم نول جمع می‌گردند زیرا هارمونیک‌های ۳، و ۹، و ۱۵، هم‌فاز هستند. در نتیجهٔ یک جریان غیر صفر در سیم نول جاری می‌شود که بسته به شرایط امکان دارد بزرگ‌تر از جریان فاز شود و کابل نول را تحت تأثیر قرار دهد.

مقالهٔ تخصصی: مقابله با هارمونیک‌ها

تا به امروز راه‌حل‌های اقتصادی بسیار ناچیزی برای کاهش هارمونیک‌ها به مصرف‌کنندگان قدرت ارائه شده است. روش معمول، نصب المان‌های پاسیو در محل تولید هارمونیک‌ها برای حذف یا تضعیف هارمونیک‌ها است که به معنی نصب مدار خازنی و سلفی جداگانه برای اثر گذاشتن بر هر هارمونیک است. اکنون مشکل با نصب فیلترهای اکتیو هارمونیک حل می‌شود.

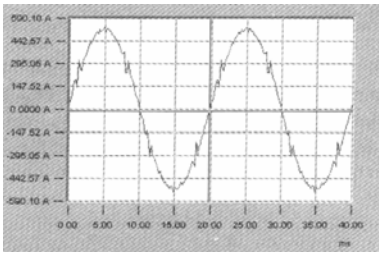
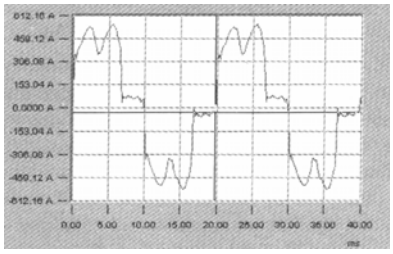
مضارب صحیح فرکانس اصلی به نام هارمونیک شناخته شده‌اند و معمولاً هر هارمونیک را با شمارهٔ آن شناسایی می‌کنند. بنابراین فرکانس هارمونیک پنجم ۲۵۰ هرتز خواهد بود. تحلیل ریاضی نشان می‌دهد که هر شکل موج متناوب را می توان به مجموع چند شکل موج کاملاً سینوسی و دارای فرکانس‌های مضارب صحیح فرکانس اصلی تبدیل کرد. در صورتی که مصرف‌کننده جریان کاملاً سینوسی از شبکه نکشد، این هارمونیک‌ها به وجود می‌آیند.

شکل موج جریان تعیین‌کنندهٔ دامنه و تعداد هارمونیک‌ها است. هر چه این شکل موج تفاوت بیشتری با شکل موج سینوسی داشته باشد، دامنه و تعداد هارمونیک‌ها نیز بیشتر و بزرگتر است.

اصول کار فیلترهای هارمونیک:

اصل کار فیلترهای هارمونیکی در یک مدار اکتیو است که هارمونیک‌ها را جذب نمی‌کند بلکه به میزان لازم هارمونیک تزریق می‌کند. ابتدا توسط یک ترانس جریان مقدار جریان لحظه‌ای بار اندازه‌گیری می‌شود، سپس بخش کنترلی مدار با تحلیل فوریه دامنه و تعداد هارمونیک‌ها را به دست می‌آورد. سپس همان میزان جریان ولی با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز به مدار تزریق می‌شود و در نتیجه جریان حاصله کاملاً سینوسی و بدون هارمونیک است. یک مزیت دیگر انعطاف‌پذیری مدار فوق است و بسته به میزان هارمونیک‌ها جریان تزریقی کم و زیاد می‌شود.

حتی در زمان اضافه‌بار فیلتر خاموش نمی‌شود بلکه حداکثر دامنهٔ جریان را به مدار تزریق می‌کند که بخش عظیمی از هارمونیک‌ها را جبران می‌کند. گسترش سیستم نیز حتی در صورت وجود چند فیلتر امکان‌پذیر است و با تغییر شرایط شبکه، فیلتر در محدودهٔ مقادیر نامی خود، با شرایط جدید وفق داده می‌شود.

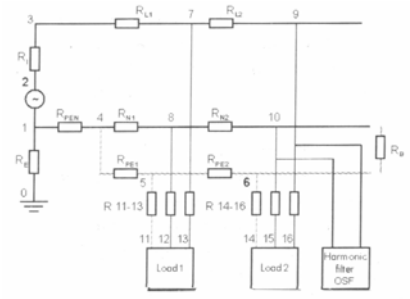
	
شکل موج جریان با فیلتر هارمونیک	شکل موج جریان بدون فیلتر هارمونیک

اهمیت تأسیسات الکتریکی:

نصب صحیح تأسیسات الکتریکی در کارکرد درست سیستم جبران هارمونیک از اهمیت بالایی برخوردار است. نوع شبکه و کیفیت تجهیزات نصب شده نه تنها بر عملکرد درست فیلتر هارمونیک اثر می‌گذارند بلکه امکان اغتشاش در منبع تغذیه نیز وجود دارد. در هر تأسیسات الکتریکی اتصال زمین از اهمیت خاصی برخوردار است. اتصال زمین خوب و مؤثر پایه و اساس هر تأسیسات الکتریکی است. در صورت وجود اشکال در اتصال زمین امکان پارازیت در ولتاژ، تداخل‌های الکترومغناطیسی و انتشار هارمونیک‌های ناخواسته در سیستم وجود دارد. کارکرد اصلی اتصال زمین جلوگیری از خسارت‌های مالی و جانی در زمان بروز خطا است. این تنها روش فعال کردن رلهٔ اضافه جریان و قطع به موقع ولتاژ است.

جداسازی سیم زمین مدار از سیم زمین حفاظتی:

در صورتی که این جداسازی انجام نشود، به دلیل وجود جریان در این سیم‌ها و تشکیل میدان مغناطیسی در اطراف آن اثرات بدی خواهد داشت و باعث ایجاد تداخل در کابل‌های شبکه و از بین رفتن اطلاعات می‌شود. اتصال سیم زمین به هادی‌هایی نظیر لولهٔ آب و گاز باعث اضافه جریان در این بخش‌ها می‌شود و باعث پارازیت در ولتاژ و خوردگی در لوله‌ها می‌شود. بنابراین در تاسیسات مدرن همواره دقت خاصی به جدا کردن سیم زمین و سیم خنثی می‌گردد. عدم توجه به این مسأله مثلاً باعث ایجاد لرزش در تصویر مونیتورها و اغتشاش در خطوط تلفن می‌شود که به دلیل وجود مقدار زیادی هارمونیک سوم در سیم زمین و سیم خنثی است.



یک مثال عملی:

یک کامپیوتر معمولی با منبع تغذیهٔ ۲۵۰ واتی جریان نشتی حدود ۱ میلی‌آمپر دارد که دارای مؤلفهٔ اصلی ۵۰ هرتزی و هارمونیک‌های آن است. جریان‌های نشتی باعث *آلوده سازی* سیم زمین می‌شود ولی در کل سیستم را به خطر نمی‌اندازد. ولی وقتی که ۱۰۰ کامپیوتر در شبکه موجود باشد، جریان نشتی در حدود ۰/۱ آمپر است. با فرض اینکه مقاومت سیم زمین ۱ اهم باشد، افت ولتاژ حدود ۰/۱ ولت خواهد بود. کل سیستم زمین معمولاً مقاومت کمی دارد. ولی در سیستمی با جریان نامی حدود ۱۰۰ آمپر جریان هارمونیک سوم حدود ۴۰ آمپر می شود و افت ولتاژ حدود ۴۰ ولت خواهد بود.

این یک مثال کلاسیک از فیلتر هارمونیک است. با حذف هارمونیک‌ها در سطح توزیع مصرف‌کنندگان دیگر از مضرات هارمونیک‌ها به دور خواهند بود. این عمل تنها در صورت مجزا بودن سیم‌های زمین و خنثی میسر است.

خلاصه:

یک روش مؤثر برای کاهش هارمونیک‌ها و اثرات نامطلوب آنها بر سیستم‌های توزیع فشار ضعیف، نصب فیلترهای هارمونیکی اکتیو است. ولی به همان اندازه اهمیت دارد که سیستم الکتریکی نصب شده به سادگی هر چه تمام‌تر باشد. در عمل توصیه می‌شود که مقدار جریان هادی زمین اندازه‌گیری شود و اضافه‌جریان‌های آن به سرعت شناسایی شود. یافتن نقاط اتصال سیم‌های زمین و سیم‌های خنثای اضافی بسیار مشکل است و لازمهٔ دانش دقیق از مسیر کابل‌ها و خود ساختمان است. تنها با پیروی از راهنمایی‌های ذکر شده می‌توان سیستم الکتریکی مناسب و بی‌اشکالی در اختیار داشت.