عنوان:

خازن ضد هارمونیک، ادعا یا واقعیت

واحد فنی شرکت فراکوه

تاریخ: ۱۴۰۳/۰۷/۹

مقدمه:

اخیرا برخی از مشتریان فراکوه از ما درخواست ساخت خازن‌هایی داشته‌اند که به تنهایی در برابر هارمونیک‌ها ایستادگی کرده و THD(شاخص هارمونیکی کل) شبکه را کاهش دهند. گرچه لفظ "خازن ضد هارمونیک" به تنهایی عجیب و گنگ جلوه می‌کند و اصولا مشکل اساسی خازن کارایی پر خطر آن در محیط هارمونیکی است؛ اما این ایده از آن‌جا برای مشتریان خازن ایجاد می‌شود که برخی ادعای ساخت چنین خازن‌هایی را دارند و آن‌را محصولی نوین می‌خوانند. ما در شرکت فراکوه همواره در راستای ارتقای کیفیت توان شبکه ملی و رعایت حقوق مشتری گام برداشته‌ایم و بر خود لازم می‌دانیم که در راستای این رسالت به تحلیل و بررسی این ادعا بپردازیم تا مشتریان بتوانند با دید گسترده‌تری تصمیم‌گیری کنند.

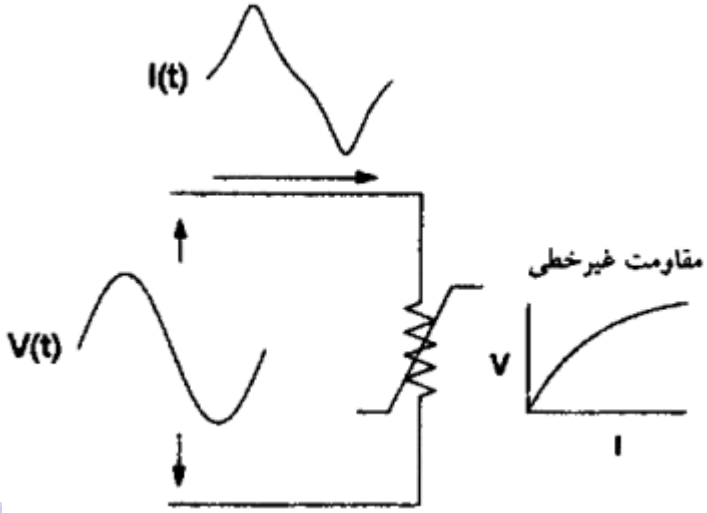
۱. هارمونیک و منشا آن

در یک سیستم قدرت ایده‌آل تمامی ولتاژها و جریان‌ها سینوسی با فرکانس ثابت ۵۰ هرتز هستند. در این شبکه تمامی بارها خطی بوده و تغییر ناپذیر با زمان هستند لذا این سیستم هیچگونه اعوجاجی نخواهد داشت. اما با پیشرفت تکنولوژی نیمه‌هادی‌ها، استفاده از آن‌ها همواره روند صعودی داشته است و این ادوات به واسطه ذات غیرخطی خود سبب اعوجاج در شکل سینوسی جریان میگردند و این جریان غیرسینوسی با عبور خود از مسیری که دارای امپدانس Z_{line} است سبب ایجاد افت ولتاژی غیرسینوسی در سیستم خواهد شد که نهایتا منجر به ایجاد اعوجاج در ولتاژ می‌گردد. اغلب این اعوجاجات به صورت پریودیک هستند. بدین معنی که سیکل-های متوالی تقریبا شبیه به هم بوده و ممکن است به آرامی تغییر کنند؛ این مفهوم در اصل همان واژه هارمونیک را توصیف می‌کند. طبق تعریف هارمونیک‌ها در حالت ماندگار رخ می‌دهند و مضرب صحیحی از فرکانس مولفه اصلی هستند و چون طبق سری فوریه می‌توان هر شکل موج متناوبی را بر حسب جمع چندین جمله سینوسی نوشت، لذا می‌توان با شکستن شکل کلی اعوجاج یافته جریان و یا ولتاژ به سینوسی‌هایی با فرکانس‌های مشخص به تحلیل ساده‌تر سیستم پرداخت.

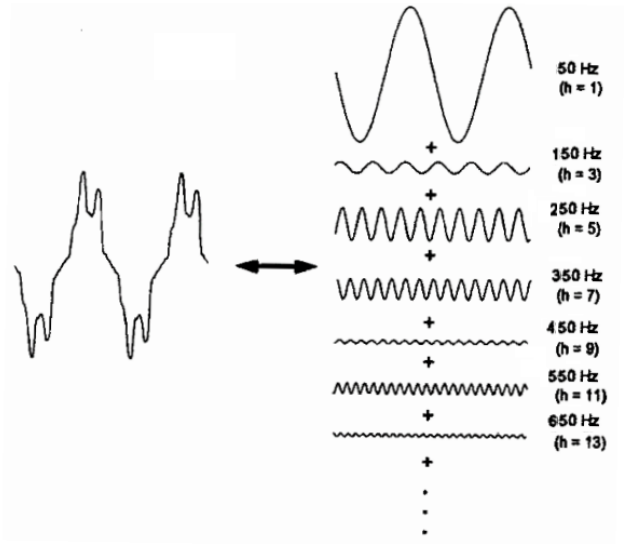
از طرف دیگر هر تجهیز مولد هارمونیک دارای هارمونیک‌های مشخصی است که در طی عملکرد صحیح تجهیز ایجاد می‌گردند. این هارمونیک‌ها را هارمونیک مشخصه می‌گوییم و انتظار داریم که در یک تجهیز هارمونیک‌های مشخصه بسیار غالب‌تر از هارمونیک‌های دیگر باشند.

مسئله حائز اهمیت بعدی این است که برخی هارمونیک‌ها در سیستم قدرت غالب‌تر از دیگر هارمونیک‌ها هستند. شناخت دقیق و کافی از این هارمونیک‌ها و مولدهای آن‌ها کمک شایانی به پیشرفت تحلیل ما خواهد

کرد. از سری فوریه می‌دانیم که اگر یک شکل موج فرد باشد، ضرایب کسینوسی آن صفر بوده و این یعنی این شکل موج، هارمونیک زوج نخواهد داشت. از طرف دیگر عمده شکل موج‌های جریانی و ولتاژی در سیستم قدرت فرد بوده و لذا هارمونیک‌های زوج چندانی در شبکه ایجاد نمی‌گردد. تنها در موارد خاصی نظیر برق‌دار کردن ترانسفورماتور شاهد این دسته از هارمونیک‌ها خواهیم بود. همچنین در مطالعات سیستم قدرت اغلب از هارمونیک-های با مرتبه بالاتر از ۴۹ صرف‌نظر می‌شود.



شکل ۱: دلیل ایجاد هارمونیک در شبکه

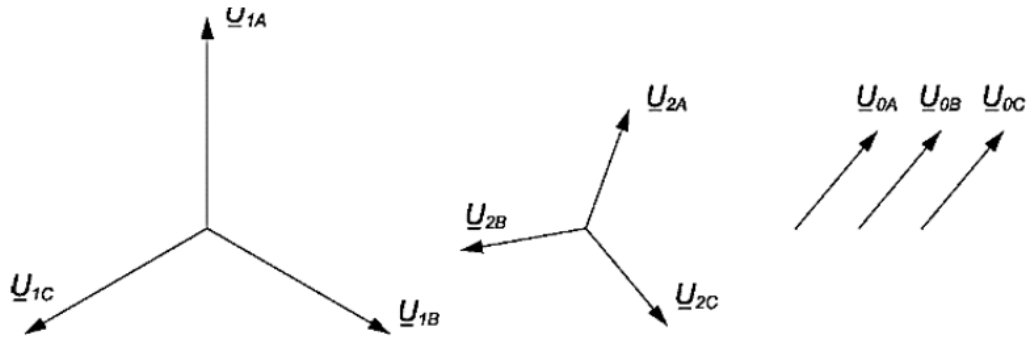


شکل ۲: بسط سری فوریه

۲. هارمونیک‌های توالی مثبت، منفی و صفر

در تحلیل یک سیستم قدرت نامتعادل می‌توان سیستم را به فضای توالی‌ها برده و به جای تحلیل یک سیستم نامتعادل، سه سیستم متعادل به نام‌های توالی صفر، توالی مثبت و توالی منفی را تحلیل کرد. ویژگی بارز هر یک از این سیستم‌ها عبارت است از:

- ✓ **توالی مثبت:** این توالی دارای فرکانس ۵۰ هرتز و توالی فازی راستگرد (abc) بوده و تمامی ولتاژها و جریان‌ها تشکیل یک دسته ولتاژ و جریان متعادل سه فازه می‌دهند.
- ✓ **توالی منفی:** این توالی دارای فرکانس ۵۰ هرتز و توالی فازی چپگرد (acb) بوده و تمامی ولتاژها و جریان‌ها تشکیل یک دسته ولتاژ و جریان متعادل سه فازه می‌دهند.
- ✓ **توالی صفر:** این توالی دارای فرکانس ۵۰ هرتز بوده و جریان تمامی فازها با یکدیگر برابر است. این قضیه برای ولتاژ نیز صدق می‌کند.



شکل ۳: یک نمونه از توالی‌های مثبت، منفی و صفر(از چپ به راست)

حال می‌خواهیم هارمونیک‌ها را به لحاظ توالی فازی که دارند مورد بررسی قرار دهیم. از توضیحات بالا مشخص است که هرگاه جریان(یا ولتاژ) هر سه فاز با یکدیگر همفاز باشند، هارمونیک مذکور توالی صفر دارد. همچنین هرگاه زاویه جریان فاز b به مقدار ۱۲۰ درجه از فاز a عقبتر و زاویه جریان فاز c به مقدار ۱۲۰ درجه جلوتر از فاز a باشد، هارمونیک موردنظر توالی مثبت دارد. جابجا شدن فاز b و فاز c در جمله قبلی سبب می‌شود هارمونیک مذکور توالی منفی داشته باشد.

می‌توان نشان داد که تمامی هارمونیک‌ها را می‌توان در یکی از سه دسته‌بندی زیر قرار داد:

- هارمونیک‌های با $n = 3k$
- هارمونیک‌های با $n = 3k - 1$
- هارمونیک‌های با $n = 3k + 1$

که در آن k یک عدد طبیعی و n مرتبه هارمونیک است.(مثلا هارمونیک ۵ام).

حال به تحلیل هریک از دسته‌های فوق می‌پردازیم:

هارمونیک‌های با $n = 3k$:

یک شکل کلی از جریان‌های سه فاز راستگرد که نماد حالت طبیعی و صحیح سیستم قدرت است را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$I_a = I_m \sin(\omega t)$$
$$I_b = I_m \sin(\omega t - 120°)$$
$$I_c = I_m \sin(\omega t + 120°)$$

فراکوه FARAKOH

حال چون این تجهیز مولد هارمونیک های $n = 3k$ است لذا جریان ها به صورت زیر خواهند بود:

$$I_{a,k} = I_m \sin(3k\omega t)$$
$$I_{b,k} = I_m \sin(3k\omega t - 360k°) = I_m \sin(3k\omega t)$$
$$I_{c,k} = I_m \sin(3k\omega t + 360k°) = I_m \sin(3k\omega t)$$

لذا واضحا هر سه جریان همفاز بوده و این دسته هارمونیک‌ها از نوع توالی صفر هستند.

هارمونیک‌های با $n = 3k + 1$:

چون این تجهیز مولد هارمونیک های $n = 3k + 1$ است لذا جریان ها به صورت زیر خواهند بود:

$$I_{a,k} = I_m \sin((3k+1)\omega t)$$
$$I_{b,k} = I_m \sin\big((3k+1)\omega t - 360k° - 120°\big) = I_m \sin((3k+1)\omega t - 120°)$$
$$I_{c,k} = I_m \sin\big((3k+1)\omega t + 360k° + 120°\big) = I_m \sin((3k+1)\omega t + 120°)$$

لذا واضحا این دسته هارمونیک‌ها از نوع توالی مثبت یا راستگرد هستند.

هارمونیک‌های با $n = 3k - 1$:

چون این تجهیز مولد هارمونیک های $n = 3k - 1$ است لذا جریان ها به صورت زیر خواهند بود:

$$I_{a,k} = I_m \sin((3k-1)\omega t)$$
$$I_{b,k} = I_m \sin\big((3k-1)\omega t + 360k° + 120°\big) = I_m \sin((3k-1)\omega t + 120°)$$
$$I_{c,k} = I_m \sin\big((3k-1)\omega t + 360k° - 120°\big) = I_m \sin((3k-1)\omega t - 120°)$$

لذا واضحا این دسته هارمونیک‌ها از نوع توالی منفی یا چپگرد هستند.

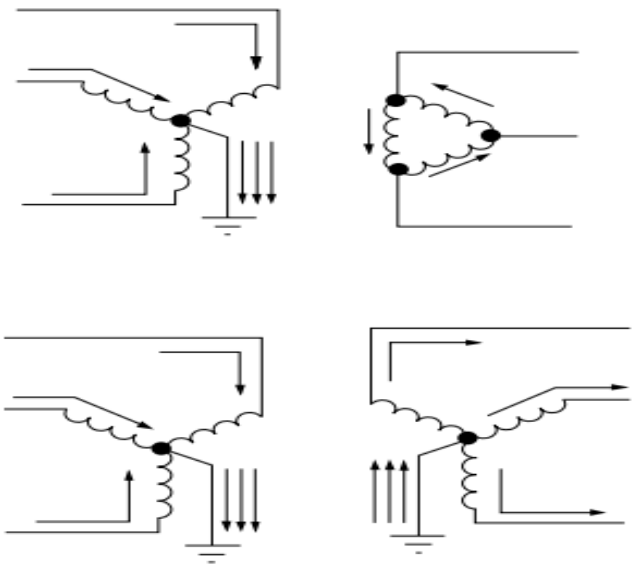
۳. تحلیل ادعای مذکور

یکی از راه‌های کاهش آلودگی‌های شبکه خازن‌گذاری صحیح می‌باشد. در عمل با تبدیل بانک خازنی به فیلتر هارمونیکی می‌توان با جابجایی نقطه رزونانس و کاهش مولفه‌های هارمونیکی از کاهش اعوجاجات کلی هارمونیک اطمینان حاصل کرد. در این زمینه اما همانطور که پیش‌تر ذکر کردیم، برخی ادعا می‌کنند که خازن‌هایی تولید کرده‌اند که به تنهایی و بدون افزودن راکتور توانایی مقابله با هارمونیک‌ها را دارا می‌باشند. در ادامه اثبات می‌کنیم که این ادعا **غلط و برای مصرف‌کننده خطرناک** است.

- **سناریو اول: شبکه فقط دارای هارمونیک‌های $n = 3k$ باشد**

در این صورت خازن‌های مورد نظر که اتصال ستاره داشته و دارای نوترال تقویت شده می‌باشند مسیری با امپدانس کمتر برای جریان هارمونیکی ایجاد می‌کنند و سبب می‌شوند از دید شبکه بالادستی THD کاهش پیدا کند. تا به اینجا ادعای مذکور غلط نیست اما باید توجه داشته باشیم که هارمونیک های مضرب ۳ یا همان $n = 3k$ به نسبت سایر هارمونیک‌های موجود در شبکه از مقدار کمتری برخوردار می‌باشند و جزو هارمونیک‌های با بیشترین مقدار اهمیت نیستند. از طرف دیگر در سطح ولتاژی فشار ضعیف که توانایی اتصال خازن‌ها به صورت مثلث وجود دارد، ستاره بستن آن‌ها سبب می‌گردد که توان راکتیو حاصله **به میزان $\frac{2}{3}$ کاهش** یابد. یعنی **توان راکتیو تولیدی توسط خازن‌های ستاره یک سوم توان راکتیو تولیدی توسط خازن‌های مثلث مشابه** است.

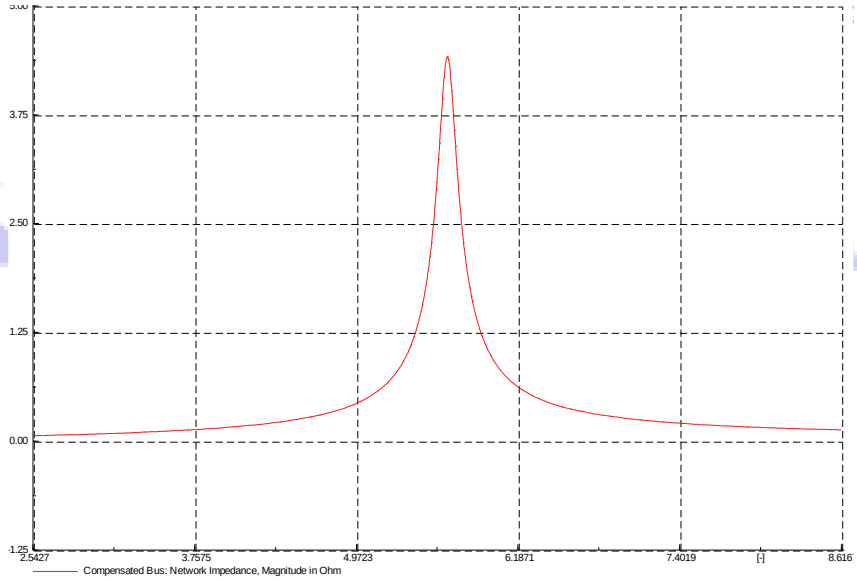
فراکوه FARAKOH



شکل ۴: عبور هارمونیک‌های توالی صفر از اتصال ستاره به سمت نوترال و محصور ماندن آن‌ها در اتصال مثلث.

- **سناریو دوم: شبکه بجز هارمونیک‌های $n = 3k$ دارای هارمونیک‌های دیگر نیز باشد.**

در این صورت بخشی از جریان‌های هارمونیکی که اتفاقا مقدار بسیار بزرگتر و قابل توجه‌تری دارند فیلتر نشده و در شبکه باقی می‌مانند. دلیل این امر آن است که دیگر مسیری برای عبور جریان‌های هارمونیکی به سمت نوترال وجود نداشته و این هارمونیک‌ها همفاز نیستند. این به منزله آن است که THD مصرف‌کننده از دید شبکه کاهش چندانی نیافته و به دلیل کاهش نیافتن THD کماکان مشکلاتی از قبیل اضافه جریان و داغ شدن کابل‌ها وجود دارد. از تمامی این موارد بدتر اینکه ممکن است بانک خازنی سبب شود نقطه رزونانس در جایی قرار گیرد که در حوالی آن فرکانس جریان هارمونیکی داشته باشیم. این امر سبب می‌شود که ولتاژ قرار گرفته بر روی خازن به شدت زیاد شود و در نتیجه به خازن آسیب‌های جبران ناپذیری بزند.



شکل ۵: رزونانس ایجاد شده در یک شبکه خازن گذاری شده بدون فیلتر

۴. نتیجه‌گیری

همانطور که بررسی و اثبات کردیم، ادعای خازن‌های ضد هارمونیک تنها برای شبکه‌هایی که صرفا هارمونیک‌های توالی صفر داشته باشند برقرار است و در بقیه شبکه‌ها کاربرد چندانی نداشته و حتی می‌تواند سبب ایجاد آسیب‌های جبران ناپذیری گردد. همچنین این خازن‌ها به واسطه آنکه با هیچ راکتوری سری نمی‌شوند توانایی تقلیل مولفه‌های هارمونیکی را ندارند. ایراد دیگر این خازن‌ها این است که حتما باید سیم نول در دسترس باشد و استفاده از این خازن‌ها در تابلویی که دسترسی به سیم نول ندارد امکان‌پذیر نیست.

پیشنهاد استاندارد برای شبکه‌هایی که علاوه بر هارمونیک‌های مرسوم شبکه قدرت نظیر ۵ و ۷ و ۱۱ و... هارمونیک سوم غیر قابل اغماضی دارند، قرار دادن فیلتر سری تنظیم شده برای هارمونیک سوم است. همچنین تقویت نوترال شبکه به وسیله قرار دادن راکتور در آن یا افزایش مقطع سیم نوترال نیز وضعیت هارمونیک سوم را بهبود می‌بخشد.

فـــراکـــوه FARAKOH