شبیه‌سازی اثر انواع اتصالات ترانسفورماتوری در کاهش هارمونیک ناشی از وجود بارهای غیرخطی

امیرحسین رنجبر
دانشگاه مازندران

سیداصغر غلامیان
دانشجوی دکترای دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

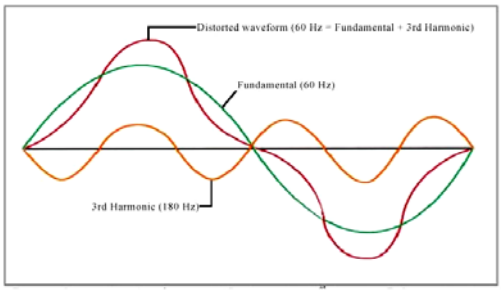
کلمات کلیدی: هارمونیک، ترانسفورماتور، THD، شبیه‌سازی، MATLAB ، بارغیرخطی

چکیده

با توجه به پیشرفت روزافزون ابزار الکترونیکی و الکترونیک- قدرت و وسعت استفاده از آنها در سیستم‌های قدرت، هارمونیک‌ها وارد سیستم‌های قدرت شده‌اند. هارمونیک‌ها، اعوجاجاتی هستند که بواسطه وجود بارهای غیرخطی در سیستم قدرت بوجود می‌آیند و سیستم را با مشکلات عدیده روبرو می‌نمایند و می‌توانند موجب عدم عملکرد صحیح برخی تجهیزات گردند. در این مقاله با مروری بر تأثیر هارمونیک‌های ایجاد شده توسط بارهای غیرخطی بر روی ترانس، این مسأله را از دیدگاه دیگری مورد بررسی قرار می‌دهیم. بدینصورت که با فرض وجود بارهای غیرخطی در یک سیستم قدرت، تأثیر انواع اتصالات ترانسفورماتوری را بر کاهش میزان هارمونیک‌های تولیدی در شکل موج‌های ولتاژ و جریان مورد بررسی قرار می‌دهیم و این کار را توسط شبیه‌سازی در محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB انجام می‌دهیم.

۱- هارمونیک

شکل موج‌های ولتاژ جریان بصورت ایده‌آل دارای شکل سینوسی کامل هستند اما بدلیل افزایش استفاده از ابزار الکترونیکی و بارهای غیرخطی، این شکل موج‌ها از حالت سینوسی خالص خارج می‌شوند. این انحراف از حالت سینوسی کامل، توسط هارمونیک معرفی و بیان می‌شود. هارمونیک‌ها خود، امواجی سینوسی با فرکانسی برابر مجموع ضرایب صحیح فرکانس اصلی (50 HZ یا 60 HZ) می‌باشند. (شکل ۱)



شکل ۱: نمونه‌ای از یک موج غیرسینوسی با هارمونیک اول و سوم

لذا برخلاف یک شکل موج ولتاژ و جریان سینوسی خالص که هیچ اعوجاج و هارمونیکی ندارد، یک موج

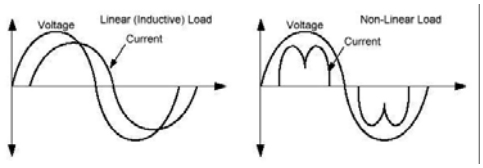
THD(Total Hamonic Distortion)

را بکار می‌بریم. این واژه، اعوجاج موجود را بصورت درصدی از شکل موج ولتاژ و جریان سینوسی کامل نشان می‌دهد. بدین طریق هر شکل موج غیرسینوسی را می‌توان بصورت حاصل‌جمع چند موج سینوسی خالص با فرکانس‌هایی برابر حاصلضرب صحیح فرکانس اصلی برق شهر (50HZ) در نظر گرفت. با تحلیل FFT(Fast Fourier Transfarmation) می‌توان فرکانس این موج‌های سینوسی را بدست آورد. و نهایتاً از THD با رابطه زیر استفاده کرده و میزان این اعوجاجات و انحراف از شکل موج اصلی را بصورت درصد بیان نمود.

$$THD = \frac{\sqrt{I_{h2}{}^2 + I_{h3}{}^2 + \ldots + I_{hn}{}^2}}{I_{h1}}$$

۲- منابع هارمونیک

هارمونیک‌ها اغلب از ایجاد جریان‌های هارمونیکی بدلیل وجود بارهای غیرخطی سرچشمه می‌گیرند. در خصوص بارهای غیرخطی می‌توان به محصولاتی از قبیل PCها، پرنیترها، کنترلرهای موتور و... اشاره نمود. با پیشرفت نیمه هادیها و استفاده از منابع تغذیه Switching این مشکل در چند دهه اخیر، حادتر شده است. اغلب این محصولات تا ۳۰ سال گذشته حضور نداشته‌اند. لذا این مشکل نتیجهٔ پیشرفت تکنولوژی است. هارمونیک‌هایی که در اثر ابزاری از قبیل PCها ایجاد می‌شوند دارای مؤلفه‌های فرکانسی بسیار بالا (مثلاً 5 MHZ) می‌باشند. همانطوریکه اشاره شد هارمونیک‌ها با ابزار الکترونیکی جدید تولید می‌شوند و اغلب زمانی بوجود می‌آیند که تعداد زیادی PC(Personal Computer) (بارهای تک فاز)، UPSها، درایوهای فرکانس متغیر (AC به DC) و یا هر ابزار الکترونیکی دیگری که از یک مبدل جهت تبدیل AC به DC استفاده می‌نمایند، در کنار هم بکار روند. بارهای غیرخطی بجای اینکه به شکل سینوسی جریان بکشند، در پالس‌های کوتاه جریان می‌کشند و هارمونیک را بوجود می‌آورند.

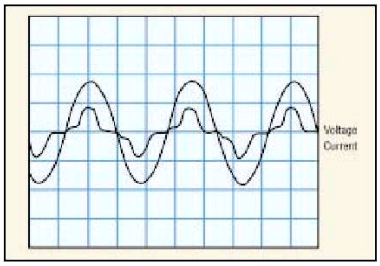


شکل ۲: مقایسه شکل موج ولتاژ و جریان یک نمونه بار غیرخطی با یک نمونه بارخطی

بعلاوه بارهایی که دارای شکل موج جریان با اعوجاج بسیار بالا هستند، ضریب قدرت پایینی دارند و بموجب آن از ظرفیت بالایی از سیستم قدرت استفاده می‌نمایند که این خود موجب Overload شدن می‌گردد. ASD (Adjustable Speed Drive)ها از این جمله‌اند که اغلب بدلیل کشیدن جریان با اعوجاج بالا دارای ضریب قدرت 0.65 هستند. هارمونیک‌های جریان خود می‌توانند شکل موج ولتاژ را نیز دچار اعوجاج کنند. این اعوجاج ولتاژ نه تنها بر بارهای الکترونیکی حساس اثر می‌گذارد، بلکه بر روی ترانسفورماتورها، موتورهای الکتریکی و بانک‌های خازنی نیز تأثیرگذار است. البته در این مقاله به تأثیر آن بر روی ترانسفورماتور پرداخته شده است.

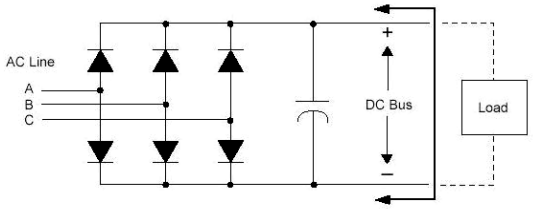
۳- چگونگی ایجاد هارمونیک توسط بارهای غیرخطی

بار غیر خطی، با وجود اینکه شکل موج ولتاژش ممکن است کاملاً سینوسی باشد جریان غیر سینوسی می‌کشد (شکل۳). بارهای غیر خطی بجای اینکه بصورت پیوسته جریان بکشند، در بخشی از شکل موج ولتاژ آمده جریان می‌کشند و گاهی اوقات نیز بصورت پاسی جریان می‌کشند و لذا شکل موج جریان دچار عوجاج می‌شود و جزء هارمونیکی این جریان می‌تواند بصورت معکوس برگردد و سایر بخش‌های شبکه را آلوده سازد. واژه خطی

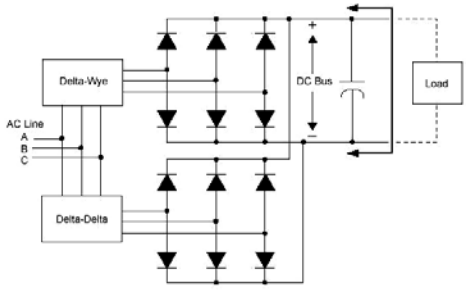


شکل ۳: شکل موج ولتاژ و جریان یک بار غیرخطی

تجهیزات با فرکانس متغیر، بدلیل ذات طبیعی طراحی Rectifireها موجب تولید هارمونیک می‌شوند. شکل (۱-۴) یک مبدل AC به DC شش پالسه دیودی را نشان می‌دهد که در صنعت بسیار کاربرد دارد. برخی از سازندگان، طرح‌های دیگری را برای قدرت‌های بالا پیشنهاد می‌کنند مثل مبدل‌های ۱۲ پالسه (شکل ۲-۴). ولی این مبدل ۱۲ پاسه هم هارمونیک ایجاد می‌کند.

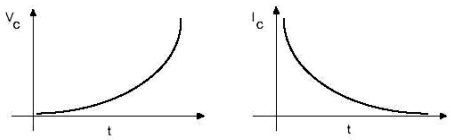


شکل ۴-۱: یک مبدل *AC* به *DC* شش پالسه دیودی



شکل ۴-۲: یک مبدل AC به *DC* ۱۲ پالسه دیودی

حال به توصیف اجمالی چگونگی تولید هارمونیک در مدار شکل (۴-۱) می‌پردازیم. خازن با کشیدن جریان همزمان و رسیدن به ولتاژ نامی شارژ می‌شود. شکل ۵، ارتباط میان ولتاژ و جریان را از لحظه اعمال قدرت نشان می‌دهد پس از یک نیم‌سیکل، خازن‌های باس DC، به پیک ولتاژ AC می‌رسند (تا این سطح ولتاژ شارژ می‌شوند) موتور متصل به باس DC، از این باس جریان می‌کشد و توان مورد نیاز بار را تأمین می‌کند. وقتی موتور از منبع باس DC، ولتاژ را دریافت می‌کند، ولتاژ بر روی خازن (بانک خازنی) کمتر از ولتاژ خط می‌شود. قبل از این که این ولتاژ به مقدار پائین‌تری برسد، خازن‌های باس DC دوباره در نیم سیکل بعدی ولتاژ سینوسی، تا پیک AC شارژ می‌شوند. لذا با این شارژ و دشارژ خازن، بار (غیرخطی) بصورت پالسی جریان می‌کشد. بنابراین، دیدیم که وقتی ولتاژ AC خط با این پل دیودی تمام موج سه فاز تبدیل به DC می‌شود، هارمونیک‌های سه فاز رخ می‌دهند.



شکل ۵: شکل موجهای ولتاژ و جریان مربوط به شارژ خازن

۴- مضرات هارمونیک بر روی ترانس

همانطوریکه بیان شد، وجود هارمونیک بر روی تجهیزات موجود در سیستم‌های قدرت تأثیر می‌گذارد و این تجهیزات تحت تأثیر هارمونیک دچار مشکل می‌شوند. بعنوان مثال، ابزار الکترونیکی بدلیل اعوجاج ولتاژ shut down می‌شوند، فیوزها بدلیل نویز ایجاد شده عمل می‌کنند، موتورها بدلیل over current ایجاد شده با under voltage از کار می‌افتند و موارد دیگر. هارمونیک‌های جریان برای ترانس که مورد اصلی بحث ماست نیز یک مشکل بحساب می‌آیند زیراموجب افزایش تلفات می‌شوند و در شرایط استفاده از بارهای با

THD بالای ۱۰۰٪) ممکن است تنها تا ٪۵۰ ظرفیت بتوان از ترانسفورماتورها استفاده نمود. هارمونیک، موجب افزایش تلفات آهنی و مسی می‌شود و با افزایش جریان گردابی ناشی از تلفات شار پراکندگی به افزایش گرما و حرارت در سیم‌پیچ‌های ترانس منجر می‌شود. در این حال، ترانس‌های توزیع محلی ممکن است بصورت القایی overheat شده و بدون هیچ دلیل روشن و موجهی طول عمر مفید آنها کاهش یابد و زودتر از موعد دچار نقص شونده استاندارد ANSI/IEEE 110- 1986 بیان می‌کند که وقتی یک ترانسفورماتور، بدلیل بار غیرخطی، جریان غیرسینوسی را بکشد که THD آن بیش از ۵٪ باشد، باید مقدار نامی آنرا تغییر دهیم. هرچند وقتی مقدار THD جریان پایین‌تر از ۱۵٪ باشد نیاز به تغییر مقدار نامی ترانس بسیار اندک خواهد بود، اما اگر این مقدار بیش از ۱۵٪ باشد باید مقدار نامی ترانس کاهش یابد. IEEE این وجود هارمونیک در شکل موج ولتاژ را محدود کرده و در جدول (۱) آمده است.

IEEE Table 11.1 Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Harmonic Voltage Distortion THD (%)[1]
69 kV and below	3.0	5.0
69.0001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

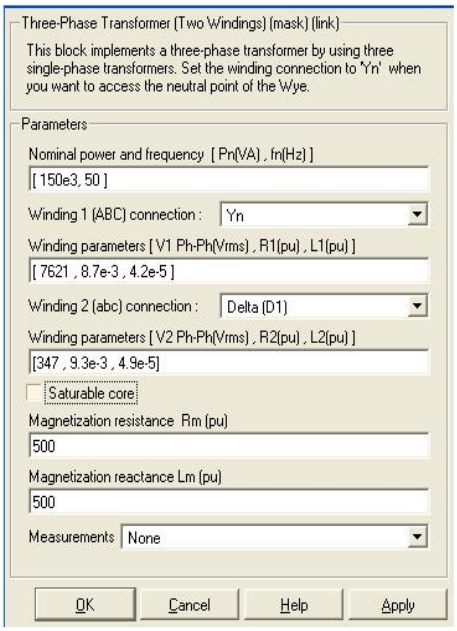
[4] High voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

جدول ۱: استاندارد IEEE

۵- شبیه‌سازی

حال پس از مروری اجمالی به تأثیرات سوء هارمونیک بر روی ترانسفورماتورها، به ذکر تأثیر انواع اتصالات ترانسفورماتوری بر کاهش میزان هارمونیک ناشی از وجود بارهای غیرخطی می‌پردازیم. به این منظور، در ادامه این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی در محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB، یک بار هارمونیکی را به ترانسفوماتور 3ϕ با اتصالات مختلف و متنوع اعمال نمودیم و شکل موج‌های ولتاژ فازی (V_ϕ) ولتاژ خط (V_L)، جریان خط (I_L) در قسمت بار غیرخطی و جریان سیم نول (I_n) (در صورت وجود) را در هر مورد بررسی و دامنه مؤلفه‌های هارمونیکی موجود در هر یک از این شکل موج‌ها را با استفاده از تحلیل FFT (بکمک برنامه‌نویسی در محیط MATAB) بدست می‌آوریم. و نهایتاً هم THD را در هر مورد از این اتصالات محاسبه می‌نماییم. در خاتمه با درج نتایج حاصله از شبیه‌سازی در یک جدول، پیشنهاد خود را جهت انتخاب طرحی بهینه با در نظر گرفتن موارد فوق‌الذکر بیان می‌نماییم. مقادیر مربوطه برای ترانس و بار غیرخطی از این شبیه‌سازی به شرح ذیل است:

مشخصات ترانسفورماتور

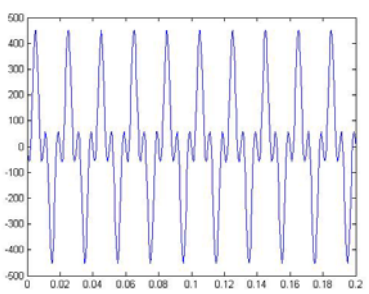
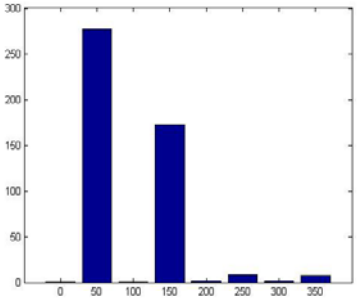


مشخصات بار غیرخطی: یک بار سه فاز با اتصال ستاره که به ثانویه ترانسفورماتور سه‌فاز با مشخصات فوق متصل شده و ولتاژش برابر ولتاژش ثانویه ترانسفورماتور و جریان آن سه‌فاز متعادل با مؤلفه‌های هارمونیکی زیر است:

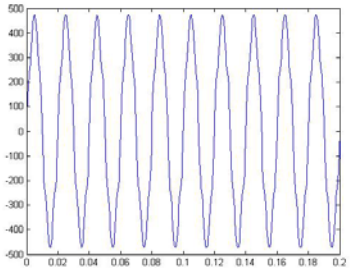
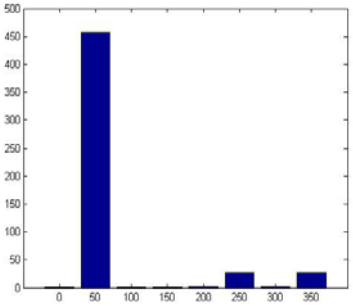
مرتبه هارمونیک	دامنه هارمونیک (آمپر)
هارمونیک اول	217.1
هارمونیک سوم	62.4
هارمونیک پنجم	34.9
هارمونیک هفتم	14.98

حال هر یک از اتصالات را بصورت جداگانه بررسی می‌نماییم.

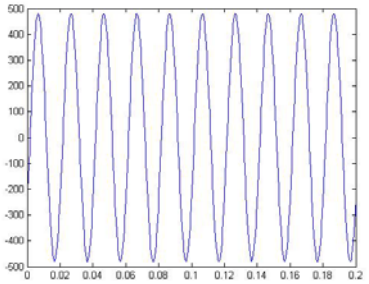
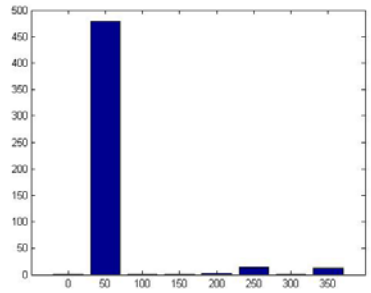
۱- اتصال (اولیه: ستاره- ثانویه: ستاره زمین شده)

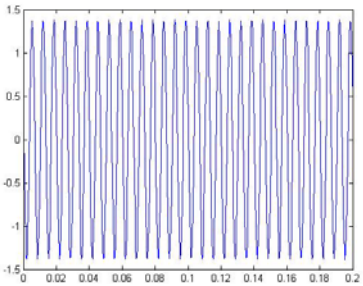
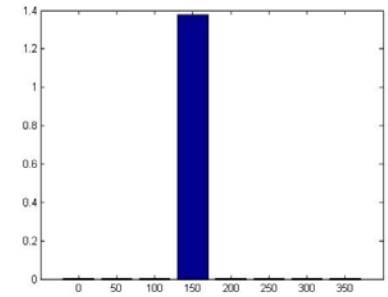
V_ϕ

I_L

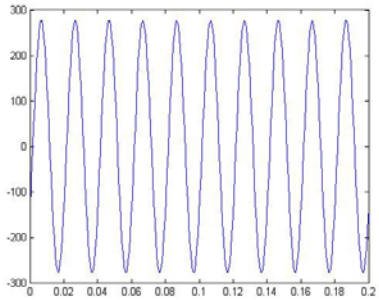
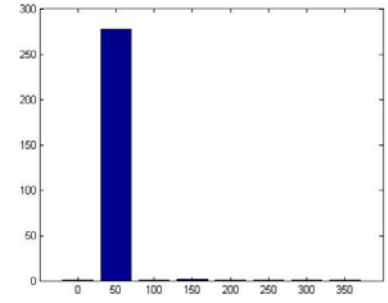



V_L

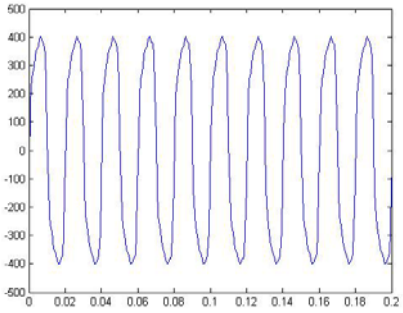



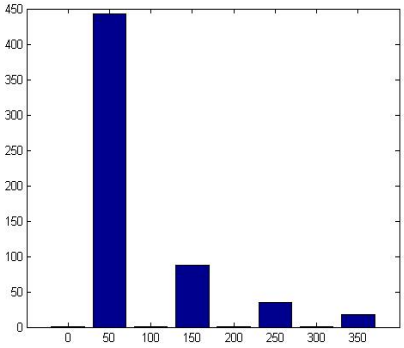
I_n

۲- اتصال (اولیه: مثلث – ثانویه: ستاره زمین شده)

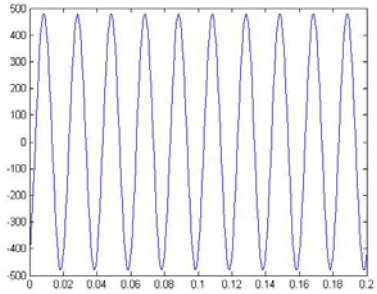



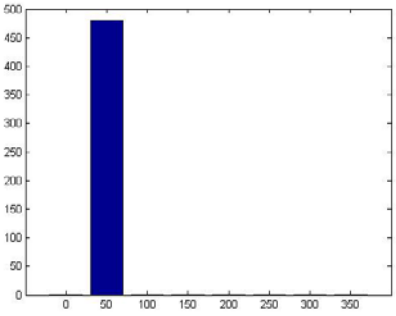
V_{ab}



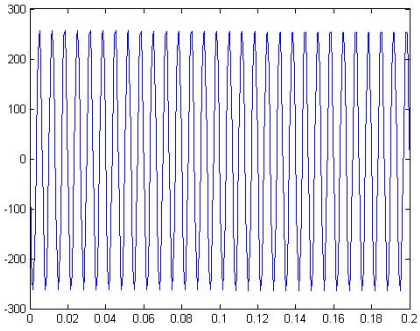


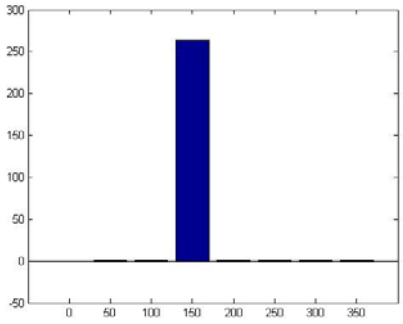
I_L





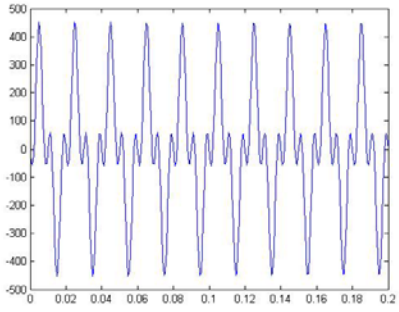
V_L

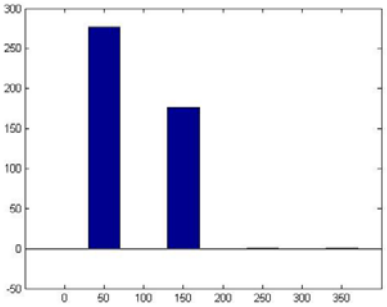




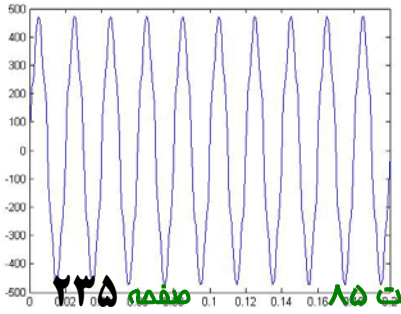
I_n

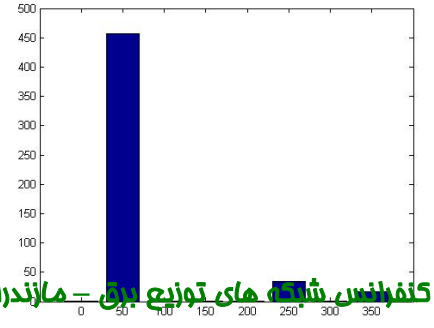
۳- اتصال (اولیه:مثلث – ثانویه: مثلث)



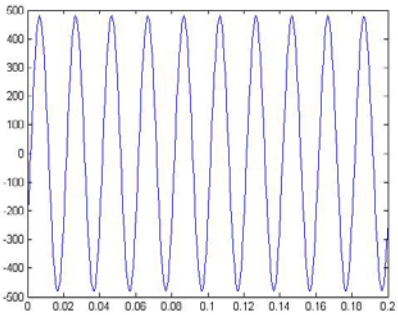


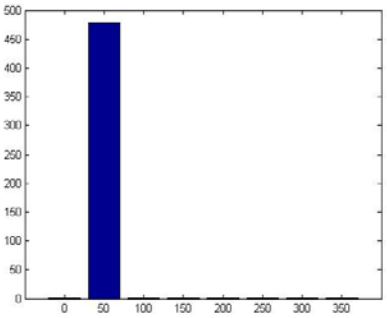
V_{ab}





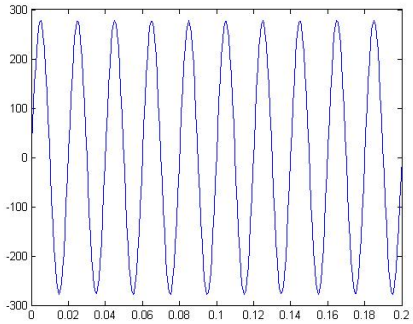
I_L

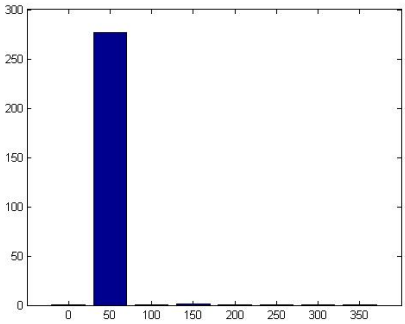




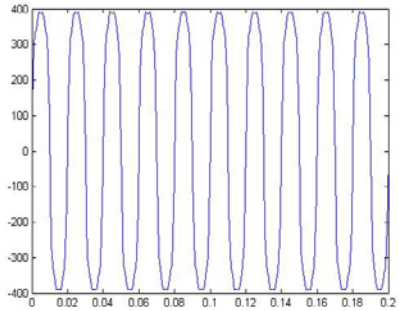
V_L

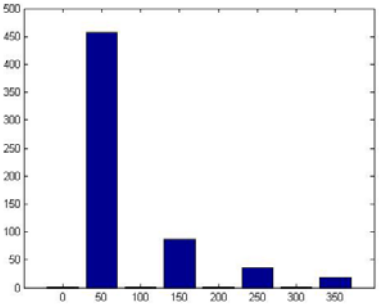
۴- اتصال (اولیه: ستاره زمین شده- ثانویه: ستاره زمین شده)



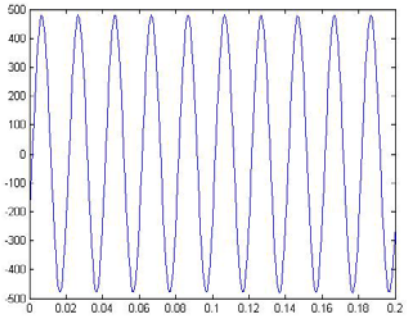


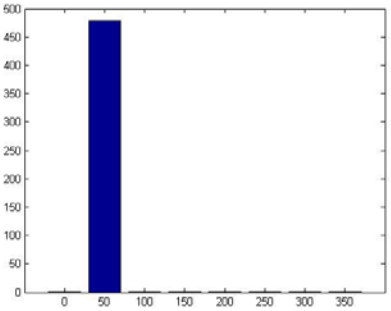
V_ϕ



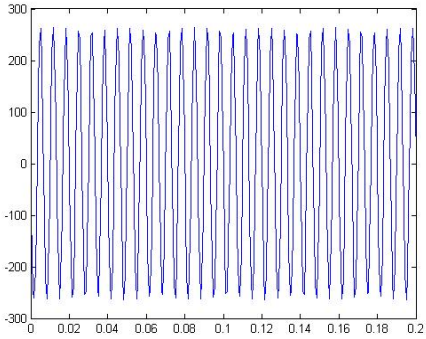


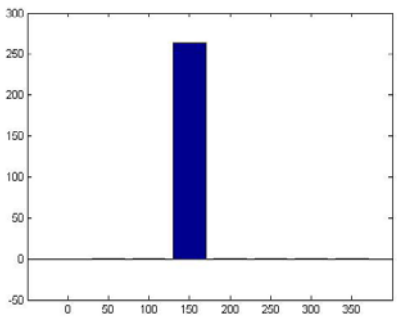
I_L





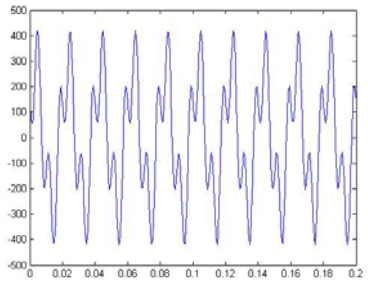
V_L

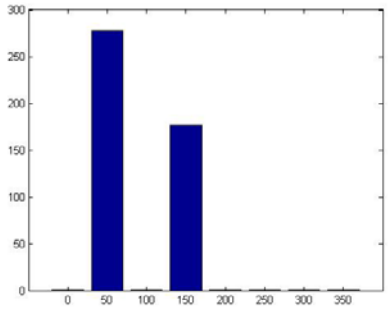




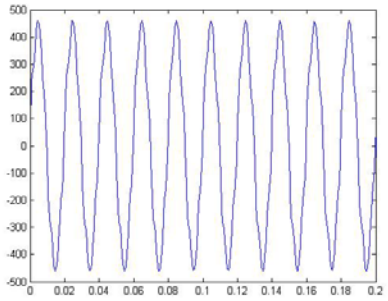
I_n

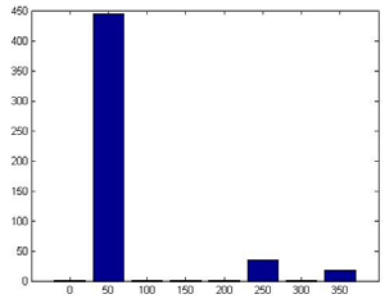
۵- اتصال (اولیه:ستازه زمین شده - ثانویه: مثلث)



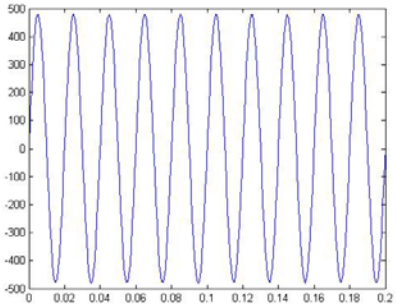


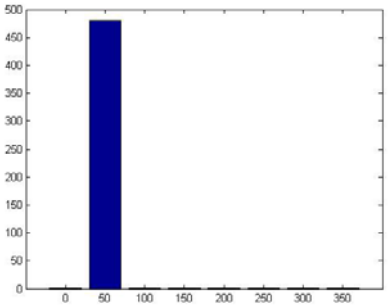
V_a



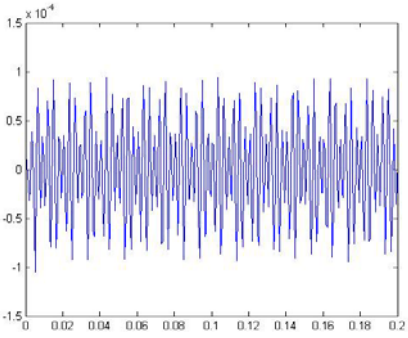


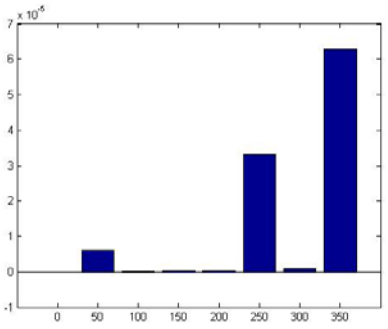
I_L





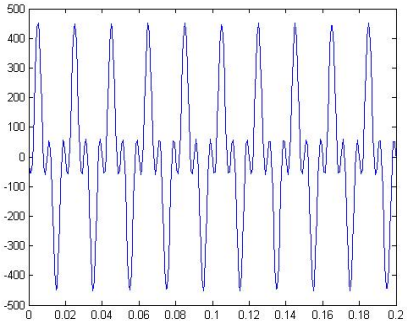
V_L

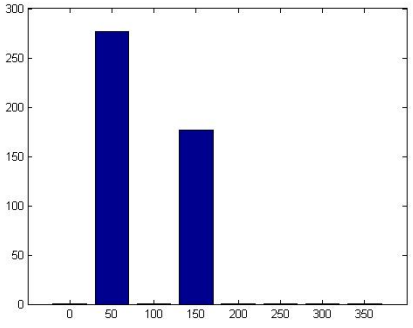




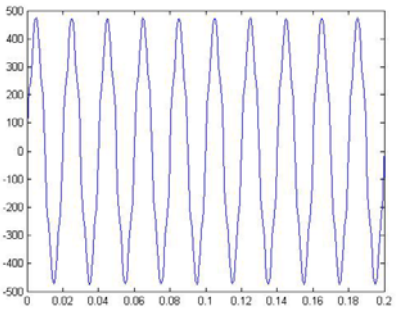
In_1

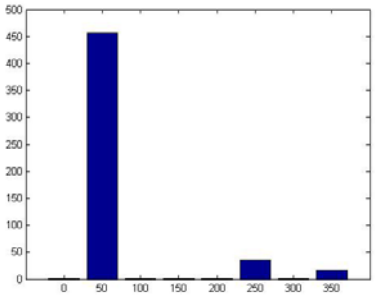
۶- اتصال (اولیه: ستاره- ثانویه: ستاره)



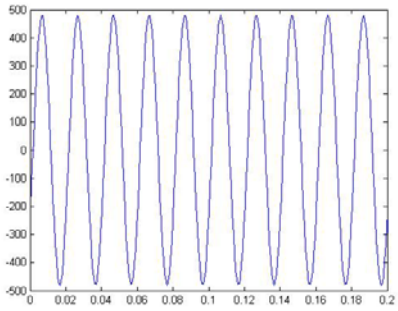


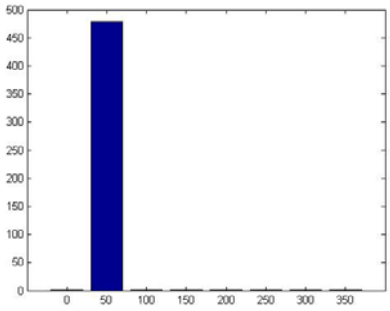
V_a





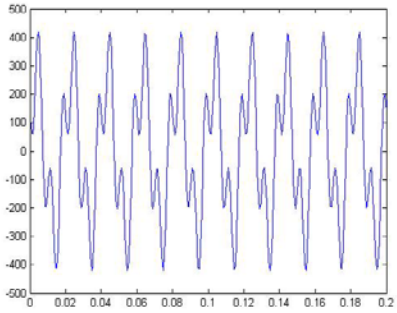
I_L

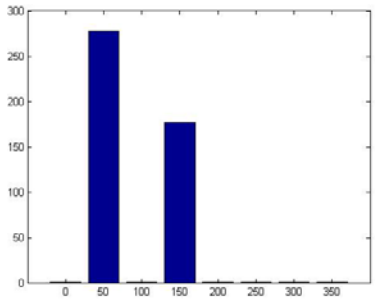




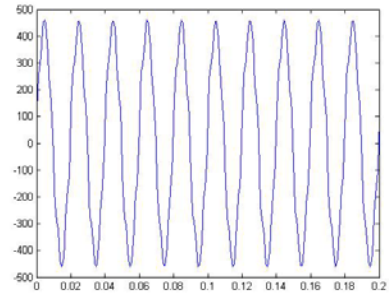
V_L

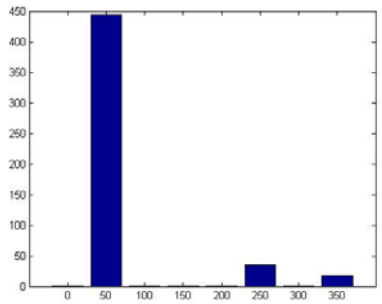
۷- اتصال (اولیه: ستاره- ثانویه: مثلث)



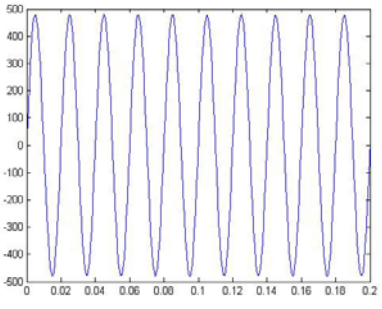


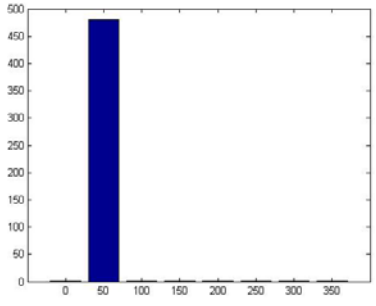
V_{ab}





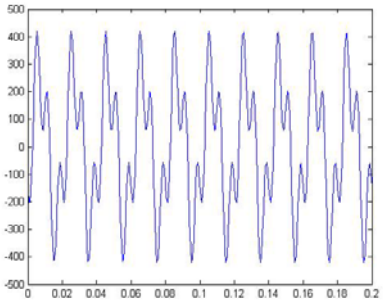
I_L

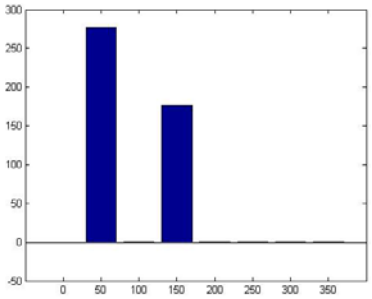




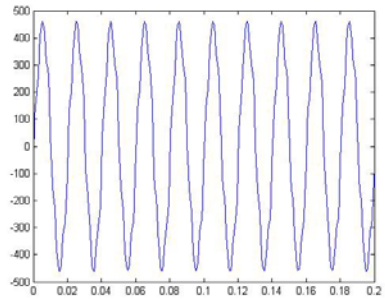
V_L

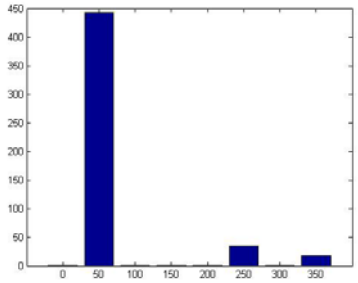
۸- اتصال (اولیه: مثلث- ثانویه: ستاره)



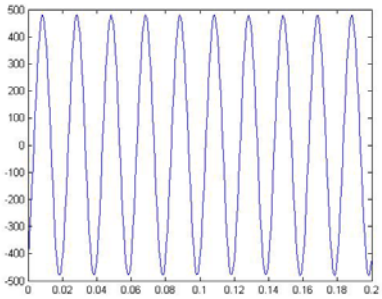


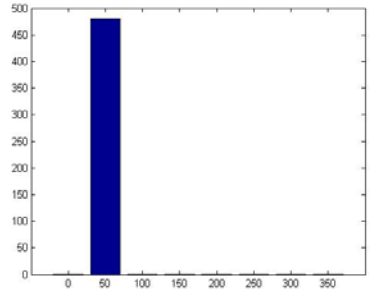
V_ϕ





I_L





V_L

حال با برنامه‌نویسی در محیط *MATLAB*، مقدار *THD* موجود در هریک از شکل موج‌های V_ϕ، V_L و I_L مربوط به اتصالات ترانسفورماتوری بررسی شدهٔ فوق را بدست آورده و آنرا در جدول زیر درج می‌کنیم:

جدول شماره ۲:

نوع اتصال	اولیه: ستاره ثانویه: ستاره زمین شده	اولیه: مثلث ثانویه: ستاره زمین شده	اولیه: ستاره زمین شده ثانویه: ستاره زمین شده	اولیه: ستاره ثانویه: ستاره	اولیه: مثلث ثانویه: مثلث	اولیه: ستاره زمین شده ثانویه: مثلث	اولیه: ستاره ثانویه: مثلث	اولیه: مثلث ثانویه: ستاره
میزان *THD* در V_ϕ	۶۲/۴۴ ٪	۰/۶ ٪	۰/۵۵٪	۶۳/۹۱٪	۶۳/۸۹٪	۶۳/۷۷٪	۶۳/۷۲٪	۶۳/۸۶٪
میزان *THD* در I_L	۸/۴ ٪	۲۱/۷ ٪	۲۱٪	۸/۵۹٪	۸/۵۶٪	۸/۹٪	۸/۹٪	۸/۸۱٪
میزان *THD* در V_L	۴/۰۱ ٪	۰/۴۵ ٪	۰/۳۵٪	۰/۳۵٪	۰/۳۶٪	۰/۱۲٪	۰/۱۶٪	۰/۴۴٪

تحلیل نتیجه بدست آمده از شبیه‌سازی:

باید بگوییم، هر وقت که (در حضور بارهای غیرخطی)، هارمونیک‌های موجود در شکل موج جریان بتوانند مسیر خود را ببندند، در شکل موج ولتاژ فاری، هارمونیک بسیار کمی خواهیم داشت و در غیر اینصورت، در شکل موج V_ϕ، هارمونیک داریم. در اتصال (اولیه: ستاره زمین شده- ثانویه: ستاره زمین شده)، چون مسیر هارمونیک سوم جریان از طریق سیم نول در ثانویه بسته می‌شود و در اولیه هم از طریق سیم نول، این جریان قابلیت عبور را دارد، لذا در شکل موج ولتاژ فازی، هارمونیک سوم که دامنهٔ بیشتری نسب به مؤلفه‌های ۵ و ۷ هارمونیک دارد، حضور نخواهد داشت و THD موجود در شکل موج V_ϕ تنها ناشی از مؤلفه‌های هارمونیک ۵ و ۷ می‌باشد که چون دامنهٔ آنها بسیار اندک است، میزان THD کوچک است.

اما در اتصال (اولیه: مثلث- ثانویه: ستاره زمین شده)، در ثانویه مسیر هارمونیک سوم جریان بسته می‌شود و در اولیه، در هریک از فازها، یک ولتاژ هارمونیک سوم را القاء می‌کند که بدلیل بسته بودن مسیر (بدلیل اتصال مثلث) این سه ولتاژ هارمونیک سوم، همانند سه منبع ولتاژ با هم سری شده و جریان گردشی را جاری می‌کنند که شار تولیدی در اثر عبور این جریان، با هارمونیک سوم ولتاژ فازی مخالفت کرده و آنرا حذف می‌نماید. و در مورد اتصالات دیگر، چون مسیر جریان هارمونیک سوم، نمی‌تواند خود را ببندد، لذا شکل موج جریان فاقد این هارمونیک بوده و لذا THD کمتری داشته و سینوسی‌تر می‌شود و در نتیجه، شکل موج ولتاژ غیرسینوسی‌تر شده و علاوه بر هارمونیک پنجم و هفتم، هارمونیک سوم را هم در بر دارد.

نتیجه‌گیری

همانطوریکه در شبیه‌سازی فوق دیدیم، با حضور بارهای غیرخطی، تحت تأثیر انواع اتصالات ترانسفورماتوری مختلف، میزان هارمونیک موجود در شکل موج‌های (V_L) در تمام اتصالات بسیار اندک و قابل صرفنظر کردن است زیرا اعوجاج موجود، ناشی از مؤلفه‌های پنجم و هفتم هارمونیک است که دامنهٔ کمی دارند (توجه به این نکته ضروری است که در ولتاژ خط بدون توجه به نوع اتصال، هارمونیک سوم وجود ندارد). اما در مورد ولتاژ فازی بار (V_ϕ)، مقدار THD بسته به نوع اتصال، اختلاف فاحشی دارد. لذا اگر بخواهیم از دید V_ϕ بررسی نماییم، با توجه به جدول شماره ۲، در حالت (اولیه: مثلث- ثانویه: ستاره زمین شده) و در حالت (اولیه: ستاره زمین شده- ثانویه: ستاره زمین شده)، کمترین میزان THD در شکل موج V_ϕ وجود دارد و این در حالی است که در این دو اتصال، نسبت به اتصالات دیگر، بیشترین میزان THD را در شکل موج جریان خط (I_L) شاهد هستیم. نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است که مطابق تحلیل فوق، اگر بخواهیم از دید ولتاژ فازی، طرحی مناسب را جهت کاهش میزان هارمونیک ناشی از وجود بارغیرخطی ارائه دهیم، بهترین طرح‌ها، اتصال (اولیه: ستاره زمین شده- ثانویه: ستاره زمین شده) و اتصال (اولیه: مثلث- ثانویه: ستاره زمین شده) می‌باشند. از دید ولتاژ خط، بجز در اتصال (اولیه: ستاره- ثانویه: ستاره زمین شده) که THD ٪۴ را داریم و THD در این اتصال بیشترین مقدار خود را دارد، در بقیه اتصالات مقدار THD تقریباً یکسان بوده و لذا فرق چندانی وجود ندارد (البته در اتصال (اولیه: ستاره زمین شده- ثانویه: مثلث) و (اولیه: ستاره: ثانویه: مثلث). میزان THD در شکل موج V_L، به میزان اندکی، کمتر از سایر اتصالات است). و از دید جریان بار، در حالت (اولیه: مثلث- ثانویه: ستاره زمین شده)و (اولیه: ستاره زمین شده- ثانویه: ستاره زمین شده)، بیشترین میزان THD را داریم و لذا سایر اتصالات (که تقریباً همگی به یک میزان THD دارند) پیشنهاد می‌شوند.

منابع

1. Power Transformer Attenuates Harmonics, By Brian Gladstone, Director of engineering and Henry pajooman, Technical Editor, Plitron manufacturing Inc…, toronto, canada.

2. Industrial and Commercial Power Systems Analysis, ANSI/IEEE Std. 399-1990, Chapter 10.

3. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, ANSI/IEEE Std. 519-1992.

4. John F. Hibbard and Michael Z. Lowenstein, "Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits", TCI(Trans Coil, Inc.), 1993.

5. "In Tune with power Harmonics", John Fluke Mfg Co., Inc., 1991.

6. Ed Palko, "Living with Power Ststem Harmonics', Plant Engineering, June 18, 1992,pages 48-53.

7. "Harmonic Filtering- A Guide for the Plant Engineer", Commonwealth Sprague Capacitor, Inc., 1991.

8. Principles of electric machines and power electronics, P.C. Sen.