



Analysis and Implementation of Harmonic Elimination of a Synchronous Generator Supplying Nonlinear Loads

Hossein Asgharpour-Alamdari^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.19.2020

Revised: 07.12.2021

Accepted: 07.26.2021

Keyword:

Synchronous generators

Non-linear loads

Power networks

Harmonic contents

THD

***Corresponding Author:**

Hossein Asgharpour-Alamdari

Email:

Asgharpour_alamdari@tvu.ac.ir

ABSTRACT

One The generation of sinusoidal voltage in terminal of synchronous generators is often non-sinusoidal due to the connection of non-linear loads to it. Under these conditions, the flowing current and voltage waveforms would considerably be affected. This would ultimately result in destructive effects such as increased losses, frequency fluctuations, reduced grid stability as well as reduced power quality of the load. Accordingly, this paper examines the various harmonic components and their impact on synchronous generators with conventional windings feeding nonlinear local loads. The consequences of the harmonic contents of the output waveforms by varying nonlinear loads were tested practically by implementing the single and triple layer winding synchronous generators. Then, the energy-saving lightbulb, the three-phase induction motor, and the incandescent lamp connected to the diode bridge (using power electronic components) were utilized as three non-linear electrical charges. Finally, the obtained results were evaluated by calculating the THD of the different states of the experiments performed on the two designs (three-layer winding design instead of one-layer winding). By comparing the experimental THD, the three-layer winding design was superior to the conventional one.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



تحلیل و اجرای روش حذف مؤلفه‌های هارمونیک ژنراتور سنکرون با بارهای غیرخطی

حسین اصغرپور علمداری^{*۱}

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

شکل موج ولتاژ تولیدی در ترمینال ژنراتورهای سنکرون غالباً غیرسینوسی می‌باشد و در صورتی که بارهای مصرفی از نوع غیرخطی به آن متصل گردند ولتاژ غیرسینوسی دوسر بار ایجاد می‌گردد که باعث کاهش کیفیت توان در مصرف‌کنندگان می‌شود. در این شرایط، وجود مؤلفه‌های هارمونیک باعث پدید آمدن آثار مخربی از جمله افزایش تلفات، نوسانات فرکانس و کاهش پایداری شبکه خواهد شد. در این مقاله به بررسی مؤلفه‌های مختلف هارمونیک و اهمیت آن در ژنراتورهای الکتریکی متصل به شبکه محلی بر پایه تمرکز بر سیم‌پیچی‌های متداول در بارهای غیرخطی پرداخته می‌شود. سپس با اتصال بارهای مختلف غیرخطی به ژنراتور سنکرون یک و سه لایه، آثار مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان به‌صورت عملی آزمایش شده است. لامپ کم‌مصرف، موتور القایی سه فاز و لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود (استفاده از قطعات الکترونیک قدرت) به‌عنوان سه بار الکتریکی غیرخطی در این مقاله آزمایش شدند. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده، با محاسبه THD حالات مختلف آزمایش‌های انجام شده بر دو طرح (طرح سیم‌پیچی سه لایه به‌جای سیم‌پیچی یک لایه) موردنظر ارزیابی شد. با مقایسه تی اچ دی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، برتری طرح سیم‌پیچی سه لایه نسبت به طرح متعارف می‌باشد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

کلید واژگان:

ژنراتور سنکرون
بارهای غیرخطی
شبکه‌های قدرت
مؤلفه‌های هارمونیک
THD

^{*} نویسنده مسئول: حسین اصغرپور علمداری

پست الکترونیکی:

Asgharpour_alamdari@tvu.ac.ir



مقدمه

در دنیای امروز، استفاده گسترده از بارهای غیرخطی، موجب تزریق مؤلفه‌های هارمونیک جریانی در شبکه‌های قدرت می‌شود که آثار آن باعث افزایش تلفات در خطوط انتقال و مصرف‌کنندگان و همچنین تخریب کیفیت توان می‌شود. با اعمال بارهای غیرخطی، به‌منظور حفظ و پایداری شبکه، می‌توان از فیلترهای مختلف الکترونیک قدرت استفاده کرد [۱]؛

۲. در بارهای صنعتی، توان ظاهری، متشکل از توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشد ولی در بارهای غیرخطی، توان ظاهری، مؤلفه دیگری به نام توان اعوجاجی دارد. مقدار این توان در مؤلفه اصلی صفر است اما در مؤلفه‌های دیگر دارای مقدار می‌باشد. برای بیان این کمیت، مرجع [۳] با ارائه الگوریتمی بر پایه تکرار و با هدف حذف این توان برای بارهای غیرخطی (سلفی و کوره‌های القایی) ارائه کرده تا شکل موج ولتاژ را سینوسی‌تر کند و اعوجاج آن را بکاهد. برای این الگوریتم، تزریق بانک خازنی را در هر مرحله در دستور کار قرار داده است. همچنین در بارهای غیرخطی باید به کمیت ضریب قدرت اهمیت داده شود. مفهوم واقعی ضریب قدرت به‌زای مؤلفه اصلی می‌باشد که در حضور مؤلفه‌های دیگر باعث تغییر این کمیت می‌شود که در مرجع [۴] به این مسئله پرداخته است. اهمیت به کیفیت توان در سیستم‌های الکتریکی از اولویت طراحان می‌باشد. بارهای غیرخطی به‌طور مستقیم روی شکل موج‌های جریان و ولتاژ دوسر بار و حتی عملکرد تجهیزات خط و به‌طور خاص بر ترانسفورماتورها تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که اعمال بارهای غیرخطی باعث کاهش راندمان در ترانسفورماتورها می‌شود. در مراجع [۵؛ ۶] با بررسی مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ و جریان به تأثیرات این نوع بارها بر شبکه قدرت و در مراجع [۷-۹] با آزمایش‌های عملی ارتباط تلفات و THD^۱ ارزیابی شده است. امروزه بیشتر بارهای مسکونی، ویژگی غیرخطی دارند که مراجع [۱۰؛ ۱۱]، آثار هارمونیک بارهای خانگی را ارزیابی کرده‌اند و با محاسبه THD، ضریب قدرت و توان‌های اکتیو و راکتیو، مکان مناسبی برای استقرار فیلتر به‌منظور کاهش مؤلفه‌های هارمونیک و افزایش کیفیت توان ارائه کرده‌اند.

یکی از راه‌های مقابله با مؤلفه‌های هارمونیک در مدارات متصل به بارهای غیرخطی، استفاده از منابع تولید ولتاژ با شکل فرم‌های کاملاً سینوسی می‌باشد [۱۲]. شکل موج ولتاژ خروجی در ژنراتورها به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل در حالت عملکردی ماشین، به‌طور معمول شبه‌سینوسی می‌باشد و مؤلفه‌های هارمونیک متعددی دارند. از مهم‌ترین آثار این هارمونیک‌ها می‌توان به تغییر نقطه کار، افزایش تلفات هسته، افزایش نویز و لرزش و همچنین کاهش پایداری ماشین اشاره کرد. بنابراین، کاهش این هارمونیک‌های مزاحم، از مهم‌ترین اهداف محققان در این حوزه به‌شمار می‌آید. برای رسیدن به این هدف، یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها، استفاده از سیم‌پیچی گام کسری و گسترده در استاتور می‌باشد [۱۳؛ ۱۴]. شایان ذکر است که این روش نمی‌تواند به‌طور کامل مؤلفه‌های هارمونیک مزاحم را حذف کند؛ از این رو در مراجع [۱۵؛ ۱۶]، بر مبنای یک تحلیل ریاضی جامع با هدف کاهش دامنه مؤلفه‌های هارمونیک مزاحم، طرحی در نحوه سیم‌پیچی استاتور ماشین‌های جریان متناوب ارائه شده است. در این ساختار، با استفاده از تغییر در تعداد دور و موقعیت قرار گرفتن کلاف‌ها، مقدار هارمونیک‌های مزاحم به‌حداقل رسیده است. بنابراین، دستیابی به شکل موج مطلوب شار و به‌تبع آن بهبود مشخصه‌های عملکردی و پارامترهای ماشین میسر می‌گردد.

مرجع [۱۷]، با مطالعه سیم‌پیچی ماشین‌های AC، به بیان ضریب سیم‌پیچی پرداخته است تا مؤلفه‌های هارمونیک MMF^۲ کاهش یابد و همچنین در مرجع [۱۸] چگونگی توزیع نیروی محرکه الکتریکی در راستای کاستن مؤلفه‌های هارمونیک پرداخته است. استفاده از تبدیل و سری فوریه در شکل موج‌های ناشی از تابع سیم‌پیچی یا شکل موج MMF در مقالات متعدد مرسوم است که در مرجع [۱۹] با استفاده از این روش، رویکردی جدیدی بر پایه نمایش برداری

¹ Total Harmonic Distortion

² Magneto Motive Force

پیشنهاد داده است؛ البته به منظور دستیابی به شرایط بهینه در طراحی سیم‌پیچی ماشین‌های الکتریکی و کاهش مؤلفه‌های هارمونیک و بهبود عملکرد مشخصه‌های ماشین، استفاده از نرم‌افزارهای مختلفی در مقالات متعدد پیشنهاد گردیده است [۲۰؛ ۲۱].

در شبکه‌های محلی، اعمال بارهای غیرخطی باعث پیدایش هارمونیک‌های متعددی در شکل موج‌های ولتاژ و جریان می‌گردد. از طرفی، منابع تولید انرژی الکتریکی فاقد شکل موج سینوسی ولتاژ می‌باشند. با توجه به وجود مؤلفه‌های هارمونیک منابع ولتاژ و تولید مؤلفه‌های هارمونیک ناشی از بارهای غیرخطی، وضعیت سینوسی بودن کمیات الکتریکی را بغرنج می‌کند و باعث افزایش تلفات، نوسانات فرکانس و کاهش پایداری شبکه خواهد شد. براین اساس، در این مقاله پیرو تحقیقات صورت گرفته در مراجع [۱۵] و [۱۶] و برای بارهای غیرخطی در راستای کاهش مؤلفه‌های هارمونیک شکل موج ولتاژ دوسر بار، ژنراتور با سیم‌پیچی سه لایه به جای ژنراتور با سیم‌پیچی یک و دو لایه ارائه گردیده است. برای ارزیابی طرح سیم‌پیچی سه لایه، دو ماشین با ساختار ژنراتوری مجهز به سیم‌پیچی یک لایه و سه لایه و با اعمال بارهای غیرخطی در محیط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از این دو ماشین در شرایط مختلف بارداری، حاکی از بهبود عملکرد ماشین‌ها با استفاده از طرح سیم‌پیچی سه لایه است.

این مقاله در چهار بخش تقسیم شده که در قسمت اول، مقدماتی از مطالب مربوطه و پیشینه تحقیق ارائه گردیده و سپس در بخش دوم به معرفی ژنراتور سنکرون با سیم‌پیچی استاتور سه لایه پرداخته است. در بخش سوم، مراحل آزمایش‌های انجام شده به ازای بارهای مختلف غیرخطی اشاره داشته و در نهایت، نتیجه آن در بخش چهارم ارائه گردیده است.

آنالیز هارمونیک تابع سیم‌پیچی در ژنراتورهای سنکرون

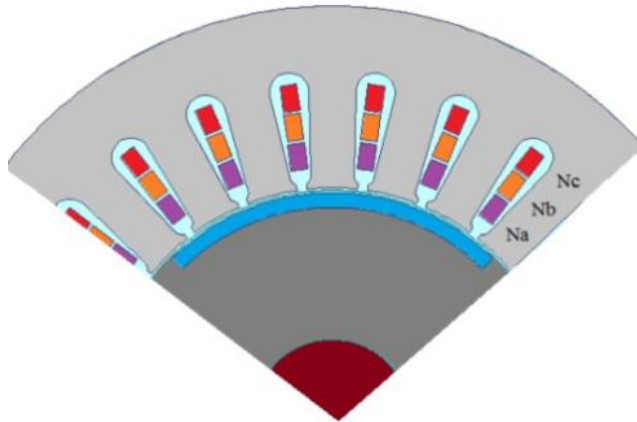
وقتی که یک بار غیرخطی به سیستم قدرت متصل می‌شود باعث به وجود آمدن جریان غیرسینوسی می‌شود. شکل موج جریان می‌تواند با توجه به نوع بار، فرمت‌های متفاوتی داشته باشد. شکل موج جریان، مؤلفه‌های متعددی از سینوسی و کسینوسی دارد که با استفاده از سری فوریه می‌توان دامنه این مؤلفه‌ها را به دست آورد. آثار این مؤلفه‌ها، بر ولتاژ مصرف‌کننده‌های دیگر تأثیرگذار خواهد بود که باعث پایین آمدن کیفیت توان در سیستم‌های قدرت خواهد شد. استفاده از انواع فیلترهای الکترونیک قدرت، راه‌کار مقابله با آن است. از طرفی، در شبکه‌های محلی، شکل موج خروجی ولتاژ ژنراتورهای صنعتی سینوسی خالص نمی‌باشد و اعوجاج دارد. به عبارتی، شکل موج ولتاژ، علاوه بر مؤلفه اصلی، دارای مؤلفه‌های هارمونیک بسیاری (معمولاً به صورت فرد) با دامنه‌های متفاوت خواهد بود. یکی از راه‌کارهای مقابله با حذف هارمونیک‌های مزاحم، طراحی ژنراتورهایی با خروجی شکل موج ولتاژ کاملاً سینوسی می‌باشد. این مقاله، ژنراتورهای سنکرون با استاتور سه لایه به جای یک و دو لایه را ارائه کرده است [۱۵]. شکل موج ولتاژ خروجی ژنراتور سه لایه در برابر ژنراتور متعارف، کاملاً سینوسی است و مؤلفه‌های هارمونیک (به جز اصلی) دارای دامنه‌ای تقریباً صفر می‌باشد. حال اگر به ژنراتور پیشنهادی (سه لایه) بار غیرخطی متصل گردد، دامنه مؤلفه‌های هارمونیک کمتر است و آثار آن هم کاهش می‌یابد.

در ماشین‌های الکتریکی جریان متناوب، ولتاژ و جریان و به همان نسبت شار در فاصله هوایی سینوسی خالص نمی‌باشد و اعوجاج دارد که باعث ایجاد اعوجاج در ولتاژ ژنراتورها می‌شود. در هر نقطه از فاصله هوایی ماشین‌های الکتریکی شاری به صورت غیرسینوسی تولید شده که با توجه به بسط سری فوریه دارای یک مؤلفه اصلی و بی‌نهایت مؤلفه‌های سینوسی و کسینوسی می‌باشد؛ اگرچه در این بسط ممکن است یک مؤلفه DC نیز ظاهر شود. به مؤلفه اول، هارمونیک اصلی و به هر جزء از مؤلفه‌های سینوسی و کسینوسی، هارمونیک مزاحم گویند. در حالت ایده‌آل، دامنه مؤلفه

اصلی حداکثر (در واحد پریونیت) و دامنه مابقی مؤلفه‌ها باید صفر شود. برای مقایسه تأثیر دامنه مؤلفه هارمونیک‌های مزاحم (غیراصلی) به مؤلفه هارمونیک اصلی (اول)، THD با رابطه ریاضی (۱) تعریف می‌شود.

$$THD = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{h=2,3,4,\dots}^n E_h^2}{E_1}} \quad (1)$$

که در این رابطه، E_h دامنه ولتاژ القایی هارمونیک h ام (به h مرتبه هارمونیک گویند) و E_1 دامنه ولتاژ القایی هارمونیک اول (اصلی) می‌باشد که در حالت ایده‌آل باید ضریب سیم‌پیچی یک و THD صفر باشد. در ماشین‌های جریان متناوب مقدار ضریب سیم‌پیچی کمتر از یک و THD مقداری بیشتر از صفر است که به صورت درصد نمایش می‌دهند. در برابر یک ژنراتور سنکرون متعارف (سیم‌پیچی استاتور به صورت یک لایه و دو لایه با گام کامل و کسری) استاتوری با سیم‌پیچی سه لایه در این مقاله ارائه گردیده است [۱۵]. در این طرح، برای تعداد N دور کلاف یک ماشین اولیه، توزیع سینوسی کلاف‌ها در همه شیارها مدنظر می‌باشد. شکل ۱ ساختار سیم‌پیچی سه لایه را نشان می‌دهد. ساختار سیم‌پیچی سه لایه که در آن N_a ، N_b و N_c تعداد دور کلاف مربوط به فازهای مختلف، به جای N دور کلاف در یک شیار استاتور می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار سیم‌پیچی سه لایه [۱۵]

برای حذف مؤلفه‌های هارمونیک مؤثر در ایجاد اعوجاج شار (مؤلفه‌های هارمونیک ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ...)، مطابق با بحث‌های ارائه شده بالا، رابطه (۲) برای محاسبه سهم هادی‌های هر کلاف در هر شیار (N_k) پیشنهاد گردیده است [۱۵].

$$N_k = \sin\left(\frac{2 * k * \pi}{Z}\right) - \sin\left(\frac{2 * (k - 1) * \pi}{Z}\right) \quad (2)$$

که در آن Z تعداد شیار استاتور و k شماره کلاف است و از آن تعداد دسته کلاف هر فاز به دست می‌آید. برای درک بهتر مفهوم ساختار سیم‌پیچی پیشنهادی در این طرح، آرایش سیم‌پیچی، شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی و دامنه مؤلفه‌های هارمونیک برای یک استاتور سه فاز، دو قطب با تعداد شیار ۱۸، در ادامه بیان می‌گردد.

برای استاتوری با ۱۸ شیار، سه فاز و دو قطب، تعداد کلاف در هر گروه فاز برابر با ۴.۵ می‌باشد. در طراحی سیم‌پیچی استاتور تعداد شیار باید عدد صحیح شود؛ لذا k برابر ۴ انتخاب می‌شود؛ پس باید N_1 تا N_4 به صورت زیر به دست آید [۱۵].

$$N_1 = \text{Sin}\left(\frac{2 * 1 * \pi}{18}\right) - \text{Sin}\left(\frac{2 * (1 - 1) * \pi}{18}\right) = 0.342 \quad (۳)$$

$$N_2 = \text{Sin}\left(\frac{2 * 2 * \pi}{18}\right) - \text{Sin}\left(\frac{2 * (2 - 1) * \pi}{18}\right) = 0.300 \quad (۴)$$

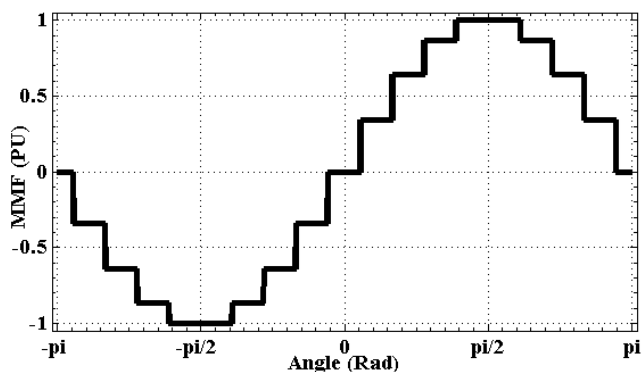
$$N_3 = \text{Sin}\left(\frac{2 * 3 * \pi}{18}\right) - \text{Sin}\left(\frac{2 * (3 - 1) * \pi}{18}\right) = 0.224 \quad (۵)$$

$$N_4 = \text{Sin}\left(\frac{2 * 4 * \pi}{18}\right) - \text{Sin}\left(\frac{2 * (4 - 1) * \pi}{18}\right) = 0.122 \quad (۶)$$

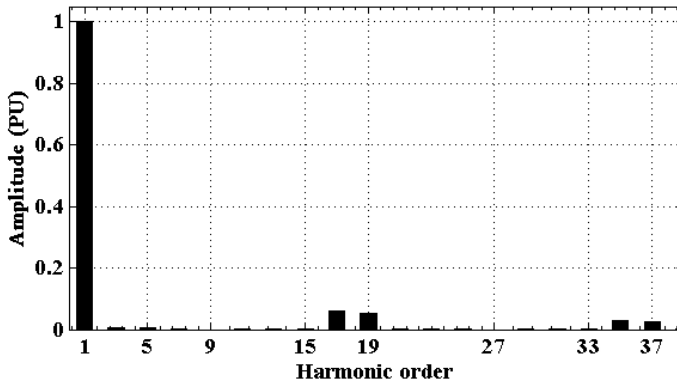
مطابق با روابط (۳)-(۶) مجموع N_1 تا N_4 باید ۱ گردد که با توجه به تغییر تعداد شیار از ۴.۵ به ۴، سهم کلاف چهارم از ۰.۱۲۲ به ۰.۱۳۴ تغییر داده می‌شود. با طراحی سیم‌پیچی خاص و به کارگیری رابطه (۱)، آرایش سیم‌پیچی، MMF و نتایج دامنه هارمونیک‌ها به صورت شکل‌های (۲) و (۳) و جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. آرایش سیم‌پیچی سه لایه ۱۸ شیار، دو قطب، سه فاز

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134
B	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224
C	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134
B	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224
C	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342



شکل ۲. MMF ناشی از سیم‌پیچی سه لایه ۱۸ شیار، دو قطب، سه فاز



شکل ۳. نمودار میله‌ای مؤلفه‌های هارمونیک‌ها در ماشین ۱۸ شیار، ۲ قطب، ۳ فاز

جدول ۲. دامنه مؤلفه‌های هارمونیک برای استاتور ۱۸ شیار، ۲ قطب، ۳ فاز

مرتبۀ هارمونیک	دامنه (%)	مرتبۀ هارمونیک	دامنه (%)	مرتبۀ هارمونیک	دامنه (%)	مرتبۀ هارمونیک	دامنه (%)
1	100	11	0.2116	21	0.0846	31	0.0482
3	0.6223	13	0.1100	23	0.0635	33	0.0565
5	0.3014	15	0.1270	25	0.0931	35	2.8530
7	0.3348	17	5.8743	27	0.0000	37	2.7011
9	0.0000	19	5.2582	29	0.0762	39	0.0423

با توجه به جدول (۲)، مؤلفه‌های ۱۷ و ۱۹ و بعد از آن هم مؤلفه‌های ۳۵ و ۳۷ دارای مقداری کمی مؤلفه هارمونیک می‌باشند که در این ساختار، بعد از هارمونیک اصلی، فقط دو گروه (گروه ۱۷ شامل ۱۷، ۳۵، ۵۳، و گروه ۱۹ شامل ۱۹، ۳۷، ۵۵،) از مؤلفه هارمونیک وجود دارند و بقیه مؤلفه‌های هارمونیک تقریباً دارای دامنه‌ای صفر یا بسیار بی‌تأثیر می‌باشند. در این ساختار مقدار THD فازی برابر ۸۸۴۸ درصد است که در مقایسه با مدل سیم‌پیچی یک لایه و دولایه گام کسری مشابه وضعیت بهتری دارد (THD1-layer=26.61% , THD2-layer=13.9%).

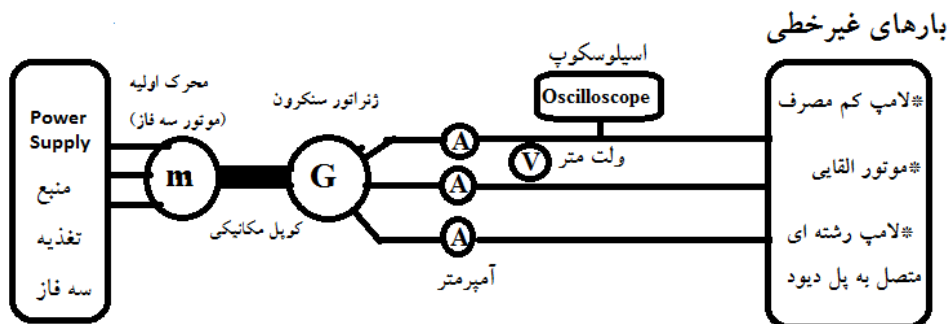
تحلیل و بررسی آزمایش‌های عملی

به‌منظور اعتبارسنجی سیم‌پیچی سه لایه ژنراتور سنکرون در مقابل سیم‌پیچی‌های متعارف یک لایه، در این مقاله، بارهای غیرخطی به دو ژنراتور سنکرون با طرح یک و سه لایه اعمال شد و نتایج به‌دست‌آمده بررسی گردید. برای آزمایش عملی در آزمایشگاه، لامپ‌های کم‌مصرف، موتورهای القایی سه فاز و لامپ‌های رشته‌ای متصل به پل دیود (بار متصل به ادوات الکترونیک قدرت) به‌عنوان سه بار غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند. بارهای ذکر شده، در دو حالت ژنراتور سنکرون با طرح سیم‌پیچی یک و سه لایه اعمال گردیده و نتایج به‌دست‌آمده مقایسه گردیده‌اند. شکل (۴-الف)، چگونگی اتصال بار به ژنراتورهای سنکرون را در آزمایشگاه و شکل (۴-ب)، شمای کلی ژنراتور متصل به بار را نشان می‌دهند. بین منبع و بار از یک اسیلوسکوپ دیجیتالی به‌منظور نمایش شکل موج ولتاژ یا جریان استفاده شده است. این آزمایش در دو حالت (ژنراتور یک و سه لایه) انجام گرفته و نتایج آن توأمان ارائه گردیده است.

پس از انجام آزمایش، شکل موج ولتاژ مستخرج از اسیلوسکوپ با روابط سری فوریه آنالیز شده و مولفه اصلی، به‌همراه مؤلفه‌های غیراصلی (تا مؤلفه ۴۰) بررسی شده است. شکل (۵)، شکل موج ولتاژ فازی در حالت بار غیرخطی (لامپ‌های کم‌مصرف) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه) در ژنراتورهای سنکرون را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه دامنه هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ تا مرتبه ۴۰ بعد از آنالیز فوریه به‌صورت شکل (۶) می‌باشد.

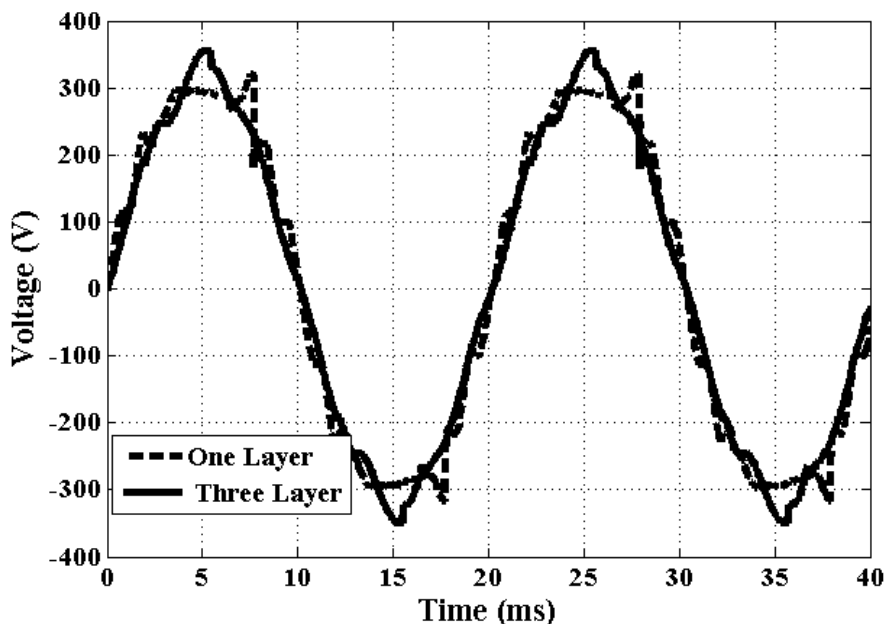


(الف)

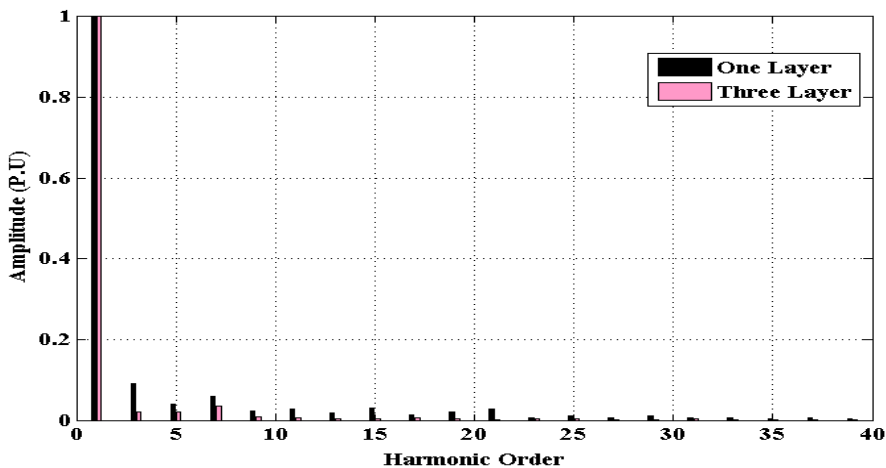


(ب)

شکل ۴. ساختار کلی ژنراتور متصل به بارهای الکتریکی
 (الف) مجموعه آزمایشگاهی (ب) شمای کلی آزمایش انجام شده



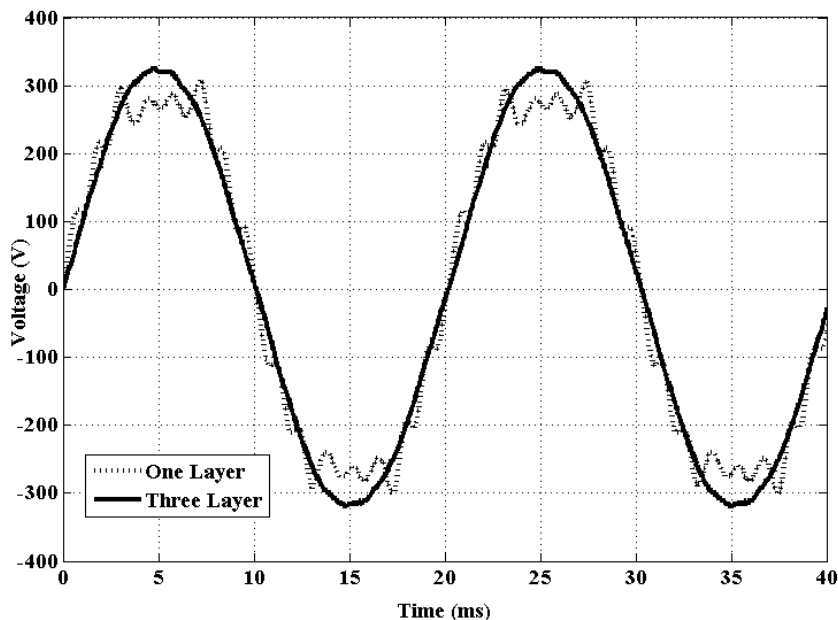
شکل ۵. ولتاژ فازی در حالت بار غیرخطی (لامپ‌های کم‌مصرف) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)



شکل ۶. مقایسه دامنه هارمونیک شکل موج‌های ولتاژ فازی در حالت بار غیرخطی (لامپ‌های کم‌مصرف) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)

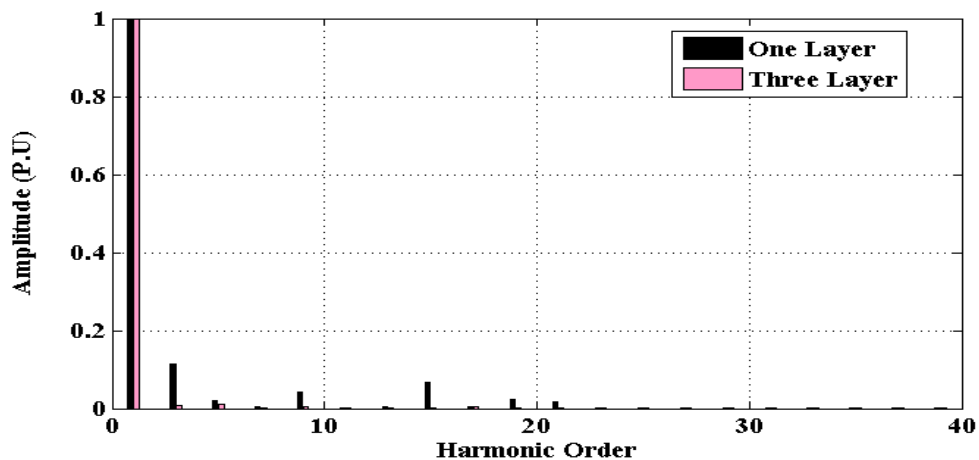
موتورهای القایی و ترانسفورماتورها به‌عنوان بار غیرخطی محسوب می‌شوند. در ادامه، یک موتور القایی سه فاز به‌عنوان بار مصرفی برای دو ژنراتور در نظر گرفته شده است. شکل موج ولتاژ و مقایسه دامنه هارمونیک‌ها برای دو

طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه) در شکل‌های (۷ و ۸) نشان می‌دهد. برای مرحله بعد، در خروجی ژنراتور یک پل دیود سه فاز و یک مجموعه لامپ رشته‌ای به‌عنوان بار در نظر گرفته شده است. وجود یک‌سوکننده باعث غیرخطی شدن بار خواهد شد. شکل موج ولتاژ و مقایسه دامنه هارمونیک‌ها برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه) در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان می‌دهد.

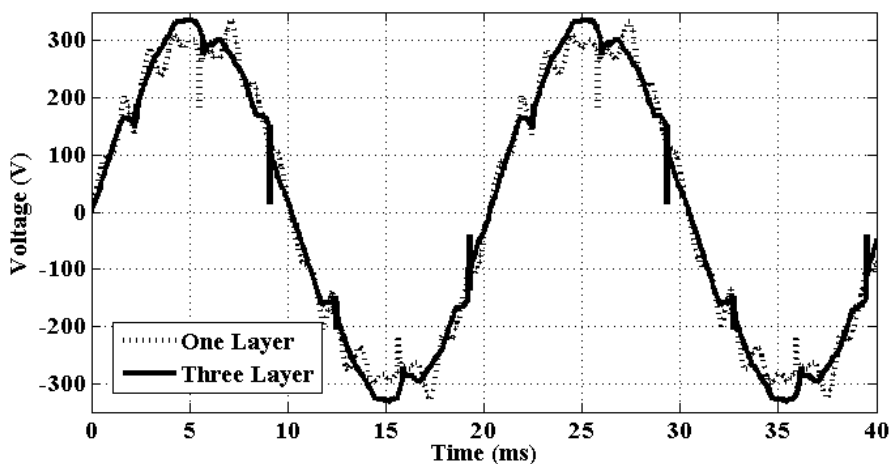


شکل ۷. ولتاژ القاشده در حالت بار غیرخطی (موتورهای القایی) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)

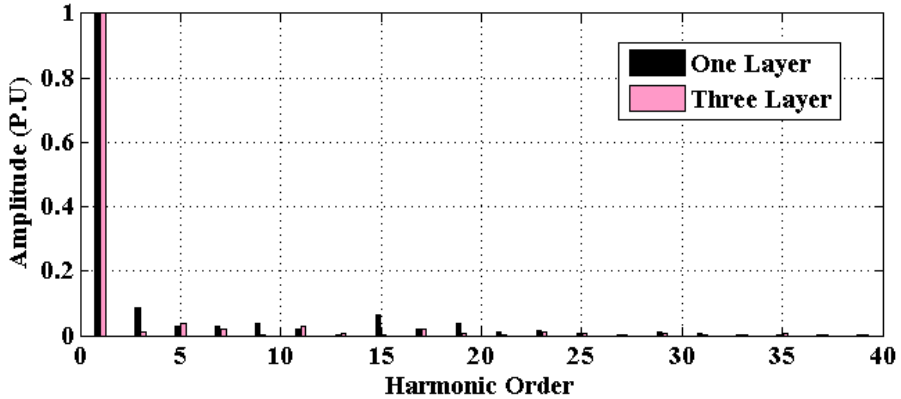
در نهایت بین ژنراتور سنکرون و بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود)، مقاومتی قرار داده تا شکل موج جریان توسط اسیلوسکوپ (شکل ۱۱) اندازه‌گیری شود. برای مقایسه دو طرح از لحاظ دامنه مؤلفه‌های هارمونیک مقدار THD را محاسبه کرده که نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۳) مشاهده می‌گردد که مقدار THD در طرح پیشنهادی نسبت به طرح متعارف کمتر است و معنی آن سینوسی بودن شکل موج ولتاژ و حذف بسیاری از مؤلفه‌های هارمونیک در دو سر بار می‌باشد.



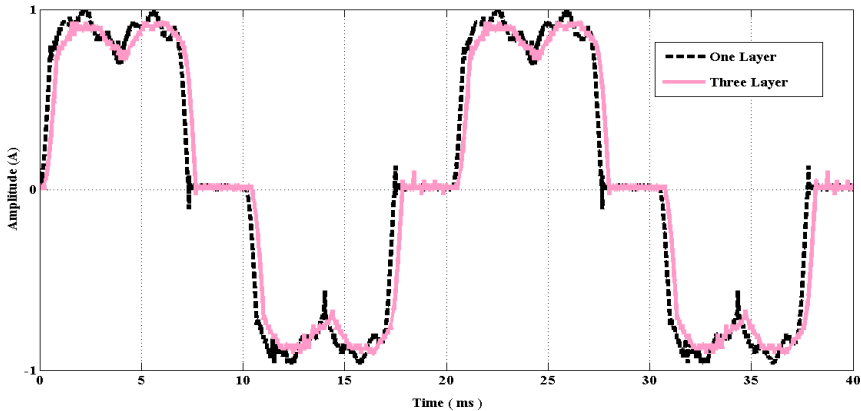
شکل ۸. مقایسه دامنه هارمونیک شکل موج‌های ولتاژ در حالت بار غیرخطی (موتورهای القایی) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)



شکل ۹. شکل موج ولتاژ در حالت بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)



شکل ۱۰. مقایسه دامنه هارمونیک شکل موج‌های ولتاژ در حالت بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود) برای دو طرح سیم‌پیچی



شکل ۱۱. مقایسه شکل موج جریان ژنراتور سنکرون (با دو طرح سیم‌پیچی یک و سه لایه) و بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود)

جدول ۳. مقایسه THD حالات مختلف آزمایش‌های انجام شده روی دو طرح موردنظر

سه لایه	یک لایه	
5.56	11.70	لامپ‌های کم‌مصرف
1.45	14.29	موتورهای القایی
6.02	13.12	لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود

نتیجه‌گیری

وجود بارهای غیرخطی در شبکه‌های قدرت باعث ایجاد مؤلفه‌های هارمونیک در شکل موج‌های ولتاژ و جریان می‌شوند. از جمله آثار مخرب این پدیده، افزایش تلفات و غیرسینوسی شدن ولتاژ مخصوصاً در شبکه‌های محلی می‌شود. برای مقابله با هارمونیک‌های مزاحم می‌توان از ژنراتورهایی با شکل موج خروجی کاملاً سینوسی استفاده کرد. در این

مقاله، عملکرد بارهای غیرخطی به‌طور آزمایشگاهی بررسی شد و بر شکل موج ولتاژ و محاسبه THD تمرکز گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ژنراتور با سیم‌پیچی سه لایه در برابر سیم‌پیچی یک لایه، برای لامپ‌های کم‌مصرف مقدار THD از ۱۱.۷۰ به ۵.۵۶ درصد کاهش داشته و برای موتورهای القایی کاهش آن چشم‌گیر می‌باشد (از ۱۴.۲۹ به ۱.۴۵ درصد). همچنین، برای لامپ‌های رشته‌ای متصل به پل دیود، اندازه‌گیری شکل موج ولتاژ و جریان به همین صورت کاهش داشته که نشان از حذف و یا تضعیف بسیاری از مؤلفه‌های هارمونیک غیراصلی در شبکه‌های محلی متصل به ژنراتور سنکرون با سیم‌پیچی سه لایه می‌باشد.

References

- [1] Liengpradis, P., & Kinnares, V. (2013, Oct 26-29). *Active power control of single-phase grid-connected system supplying nonlinear load*. 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Busan, Korea (South) <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6713323>
- [2] Tomy, G., & Menon, D. (2016, March 3-5). *Power quality improvement strategy for nonlinear load in single phase system*. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, India <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7755353>
- [3] Brusilowicz, B., Szafran, J., & Wisniewski, G. (2016, March 7-10). *Reactive power compensation of nonlinear load*. 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), Edinburgh, UK. <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2016.0095>
- [4] Sandoval, G. (2014). Power Factor in Electrical Power Systems with Non-Linear Loads. *ARTECHE/INELAP SA*
- [5] Brociek, W., Grzywacz, T., & Wilanowicz, R. (2017, Sept 11-13). *Propagation of higher harmonics of voltage and current in the power system at changing location of nonlinear load*. 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Kutna Hora, Czech Republic <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8093075>
- [6] Lai, H., Lin, W., & Pu, G. (2020, June 27-29). *Harmonic Loss Analysis of Three-phase Induction Motor Sine Winding*. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), Dalian, China <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9182571>
- [7] Biricik, S., & Özerdem, Ö. C. (2011, May 8-11). *Experimental study and comparative analysis of transformer harmonic behaviour under linear and nonlinear load conditions*. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5874818>
- [8] Sikora, R., Markiewicz, P., & Pabjańczyk, W. (2017, Sept 14-16). *Surface polynomial fitting of controlled single-phase nonlinear load of input current total harmonic distortion*. 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Lodz, Poland <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8090732>
- [9] Sikora, R., Markiewicz, P., & Pabjańczyk, W. (2018). Multivariable polynomial fitting of controlled single-phase nonlinear load of input current total harmonic distortion. *Open Physics*, 16(1), 137-142. <https://doi.org/doi.org/10.1515/phys-2018-0021>

- [10] Nikum, K., Saxena, R., & Wagh, A. (2016, Nov 25-27). *Harmonic analysis of residential load based on power quality*. 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8077306>
- [11] Sun, Y., Xie, X., Zhang, L., & Li, S. (2020). A Voltage Adaptive Dynamic Harmonic Model of Nonlinear Home Appliances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(5), 3607-3617. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2921261>
- [12] Asad, B., Vaimann, T., Belahcen, A., Kallaste, A., Rassõlkin, A., & Iqbal, M. N. (2020). Modified winding function-based model of squirrel cage induction motor for fault diagnostics. *IET Electric Power Applications*, 14(9), 1722-1734 .
- [13] Kutt, F., Michna, M., Kostro, G., & Ronkowski, M. (2017). Modelling of steady state and transient performance of the synchronous generator considering harmonic distortions caused by non-uniform saturation of the pole shoe. *Electric Power Systems Research* ,143 ,409-414 .<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.030>
- [14] Yokoi, Y., Higuchi, T., & Miyamoto, Y. (2016). General formulation of winding factor for fractional-slot concentrated winding design. *IET Electric Power Applications*, 10(4), 231-239 .
- [15] Asgharpour-Alamdari, H., Alinejad-Beromi, Y., & Yaghobi, H. (2017). Reduction in distortion of the synchronous generator voltage waveform using a new winding pattern. *IET Electric Power Applications*, 11(2), 233-241. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0502>
- [16] Asgharpour-Alamdari, H., Alinejad-Beromi, Y., & Yaghobi, H. (2018). Improvement of induction motor operation using a new winding scheme for reduction of the magnetomotive force distortion. *IET Electric Power Applications*, 12(3), 323-331 .
- [17] Tang ,N., & Brown, I. P. (2018). Framework and Solution Techniques for Suppressing Electric Machine Winding MMF Space Harmonics by Varying Slot Distribution and Coil Turns. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54, 1-12. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2804897>
- [18] Sculler, F. (2020). General, compact and easy-to-compute winding factor formulation. *IET Electric Power Applications*, 14(8), 1430 – 1437. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0950>
- [19] Caruso, M., Di Tommaso, A. O., Marignetti, F., Miceli, R., & Ricco Galluzzo, G. (2018). A general mathematical formulation for winding layout arrangement of electrical machines. *Energies*, 11(2), 446. <https://doi.org/10.3390/en11020446>
- [20] Tommaso, A. O. D., Genduso, F., & Miceli, R. (2015). A New Software Tool for Design, Optimization, and Complete Analysis of Rotating Electrical Machines Windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(4), 1-10. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2369860>
- [21] Z. Q. Li. (2019). Application of sine winding technology in the design of explosion-proof motor products. *Internal Combustion Engines and Accessories*, 5, 197-198 .