

مقدمه‌ای بر روش پیشنهادی برای کاهش اعوجاج

همان‌طور که تا به اینجا مشخص گردید، برای حذف هارمونیک‌های مراتب پایین در اینورترهای چندسطحی عمدتاً از روش محاسبه زوایای آتش استفاده می‌کنند. برای یک اینورتر چندسطحی با تعداد پله‌های ثابت، دو عامل در مقدار THD تاثیرگذارند:

۱. زاویه قطع و وصل هر کلید

۲. اندازه دامنه هر پله ولتاژی

تا به امروز، تقریباً تمامی روش‌های به کار برده شده در پژوهش‌ها و مطالعات در زمینه کاهش اعوجاج در اینورترهای چندسطحی بر مبنای عامل اول بوده‌اند. در بعضی پژوهش‌ها مانند مرجع [۱۵] اندازه دامنه‌های پله‌های ولتاژی هم در فرمول‌بندی تابع هدف تاثیرگذار بوده‌اند اما صرفاً به عنوان یک مقدار ورودی اولیه. یعنی در تحقیقات مشابه مرجع [۱۵] با فرض اینکه منابع DC ورودی باهم برابر نیستند (این فرض در عمل درست است، زیرا عمدتاً اینورترهای چند سطحی از طریق منابع انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سلول‌های خورشیدی تغذیه می‌شوند و اندازه ولتاژ خروجی هر واحد از این منابع دقیقاً با هم برابر نیستند)، زوایای کلیدزنی محاسبه و به کنترل‌کننده اعمال می‌شوند. در این روش، مقدار منابع DC را با درصدی خطا لحاظ کرده و یک تابع تصادفی^۱ مقداری معین برای هر منبع DC متصل به اینورتر چندسطحی در نظر می‌گیرد و یا اینکه چند مقدار فرضی و متفاوت به عنوان ورودی DC از همان ابتدا در محاسبات لحاظ می‌گردد.

در این بخش تکنیک پیشنهادی برای کاهش اعوجاج هارمونیک کل (THD) در اینورتر کسکید چند سطحی ارائه می‌گردد. ابتدا با بیان ایده اصلی و تحلیل پایه ریاضی این ایده، تابع هدف مورد نظر به همراه قیود لازم

¹ Random

استخراج می گردد. سپس این تابع هدف، به کمک الگوریتم های بهینه سازی، بهینه می شود. در ادامه مقادیر بهینه پله های ولتاژی به منابع DC ورودی در شبیه سازی اعمال می گردد. در نهایت با ارائه گزارش کار آزمایشگاهی، ایده مورد نظر در شرایط عملی تست گردیده و نتایج با تئوری و شبیه سازی مقایسه می شود

ایده اصلی

عمده مفاهیمی که در طبیعت وجود دارند، به صورت پیوسته^۲ می باشند. این مفاهیم پیوسته به کمک دانش بشری گسسته سازی شده و به خدمت گرفته می شوند. گسسته سازی قابلیت درک و انتقال یک مفهوم را ساده تر می سازد. به عنوان مثال، تعریف ثانیه در مفهوم پیوسته زمان، نوعی گسسته سازی است. [۲۰] برای درک بهتر عملکرد گسسته سازی به دو سوال زیر پاسخ دهید:

۱. تاکنون چند لحظه از عمر شما سپری شده است؟

۲. تاکنون چند ثانیه از عمر شما سپری شده است؟

پاسخ به سوال نخست عملاً غیرممکن است اما با گسسته سازی می توان جواب سوال دوم را بعد از محاسبه ای سر انگشتی پیدا کرد.

ساختن راه پله روی یک سطح شیب دار، مثال دیگری از گسسته سازی است. تشکیل شدن یک موج سینوسی از مجموعه پله هایی که به کمک یک اینورتر چند سطحی ایجاد می شود هم نوعی گسسته سازی است. اگر تعداد پله های روی یک سطح شیب دار (تعداد پله های ایجاد شده توسط یک اینورتر چند سطحی) به بی نهایت میل کند، آنگاه شکل راه پله به شکل سطح شیب دار (شکل موج خروجی اینورتر چند سطحی به شکل موج سینوسی) نزدیکتر می شود. اما از آنجایی که ساخت بی نهایت پله توسط اینورتر عملاً امکان پذیر نیست، به ناچار تعداد پله های ایجاد شده محدود خواهد بود. بنابراین برای بهبود شکل موج ناشی از پله ها و کاهش THD، تنها دو عامل برای تغییر و بهینه سازی باقی می ماند. همان طور که در بخش ۳-۴ اشاره شد، این دو عامل عبارتند از:

² Continuous

۱. زاویه روشن و خاموش شدن کلیدها (عرض پله)

۲. اندازه دامنه هر پله ولتاژی (ارتفاع پله)

شکل موج ولتاژ ایده آل در اینورتر چندسطحی باید سینوسی باشد. شیب یک تابع سینوسی^۳ مطابق با یک تابع کسینوسی^۴ تغییر می کند (مشتق تابع سینوس تابع کسینوس می باشد). هم چنین می دانیم که مقدار تابع کسینوس از صفر تا $\frac{\pi}{2}$ ثابت نیست. یعنی مقدار شیب یک تابع سینوسی از صفر تا $\frac{\pi}{2}$ متغیر است. از طرفی، همین پله های ولتاژی (اندازه منابع DC ورودی) هستند که شیب این تابع سینوسی را در هر ربع سیکل تشکیل می دهند. واضح است که اگر اندازه پله های ولتاژی همگی باهم برابر باشند، تابع سینوسی در هنگام صعود از صفر تا $\frac{\pi}{2}$ شیب ثابتی خواهد داشت، که این امر شکل موج ولتاژ خروجی را از شکل سینوسی دور خواهد کرد. بنابراین باید منابع DC ورودی، مقادیری نابرابر و مشخصی داشته باشند تا شکل موج خروجی به سینوسی نزدیکتر گردد.

پیدا کردن این مقادیر نابرابر و مشخص، شبیه سازی اینورتر کسکید با چنین شرایطی و در نهایت ساخت عملی آن عناوینی می باشند که در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

فرمول بندی تابع هدف

برای بدست آوردن تابع هدف، لازم است که رابطه ای را به صورت پارامتری برای معادله موج خروجی ولتاژ اینورتر چند سطحی کسکید بنویسیم. برای این منظور باید بدانیم که کدام پارامترها به عنوان متغیر و کدام پارامترها به عنوان مقادیر ثابت، وارد معادله می شوند. همان طور که گفته شد، هدف تعیین مقادیر بهینه برای پله های ولتاژی است. بنابراین اندازه منابع DC ورودی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و زمانهای کلیدزنی ثابت و برابر لحاظ می گردند. این زمان

³ Sine function

⁴ Cosine function

های کلیدزنی در واقع همان حدود انتگرال گیری در محاسبه ضرایب سری فوریه^۵ می باشند. این امر، (ثابت بودن حدود انتگرال گیری در محاسبات فوریه) روند محاسبات و بهینه سازی را سر راست تر می کند.

رابطه کلی سری فوریه به صورت زیر است:

$$f(x) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1-2)$$

که در آن x متغیر انتگرال گیری است. n شماره جمله های سری فوریه است. L نصف دوره تناوب است. ضرایب a_n و b_n ضرایبی هستند که سری فوق را به ازای هر مقدار x به سمت تابع $f(x)$ همگرا می کنند. [۲۱] این ضرایب از روابط زیر به دست می آیند:

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} f(x) \cos \frac{n\pi}{L} x dx \quad (2-2)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} f(x) \sin \frac{n\pi}{L} x dx \quad (3-2)$$

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} f(x) dx \quad (4-2)$$

عبارت $a_0/2$ در واقع مولفه DC^۶ یک تابع سینوسی را نشان می دهد.

از آنجایی که شکل موج ولتاژ خروجی یک تابع سینوسی است و سینوس تابعی فرد^۷ است، بنابراین ضرایب a_n برابر صفر خواهد بود. هم چنین طبیعی است که شکل موج ولتاژ خروجی خالی از مولفه DC بوده و ضریب a_0 هم صفر باشد. آنچه که باقی می ماند مجموعه ضرایب b_n می باشد که باید مطابق رابطه (۴-۳) محاسبه گردد.

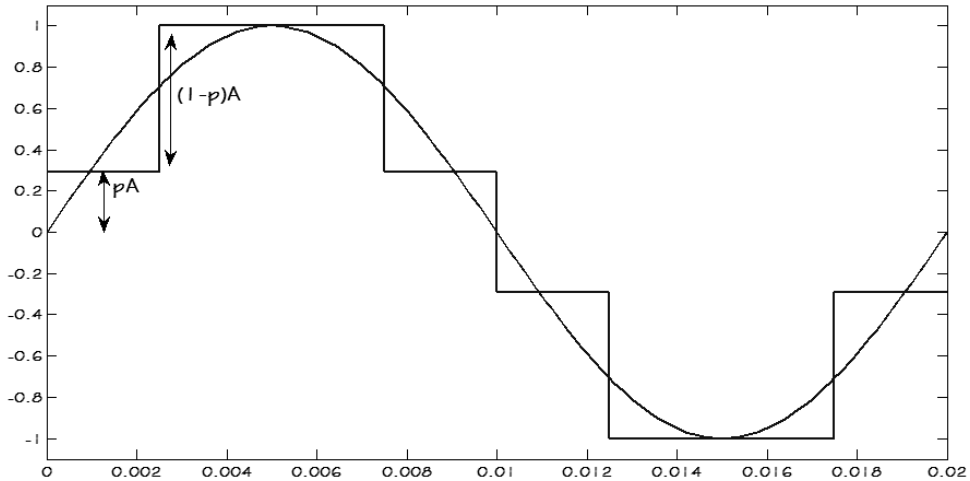
شکل ۱-۲ موج ولتاژ خروجی را برای یک اینورتر دو سطحی^۸ نشان می دهد. همان طور که از شکل پیداست، می

توان اندازه پله ها را برحسب مقدار دامنه بیان کرد.

⁵ Fourier series

⁶ DC Component

⁷ Odd function



شکل

۱-۴ ولتاژ خروجی اینورتر دو سطحی و مولفه اصلی موج ولتاژ

به این ترتیب برای اینورتر کسکید دو پله، ضرایب b_n پس از انتگرال گیری از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$b_n = \frac{4A}{n\pi} [p + (1-p)\cos \frac{n\pi}{4}] \quad (۵-۲)$$

در رابطه بالا، A دامنه ولتاژ خروجی و یا مجموع مقادیر ولتاژهای DC ورودی می باشد. p درصدی از دامنه ولتاژ است که در پله اول اتفاق می افتد. در واقع p اندازه ولتاژ اولین منبع DC را نشان می دهد. n مرتبه مولفه هارمونیک است.

بطور مشابه، می توان برای اینورتر سه پله رابطه b_n را بدست آورد:

$$b_n = \frac{4A}{n\pi} [p_0 + p_1 \cos \frac{n\pi}{6} + (1 - p_0 - p_1) \cos \frac{2n\pi}{6}] \quad (۶-۲)$$

در رابطه بالا، P_0 و P_1 به ترتیب اندازه پله های اول و دوم را نشان می دهند. واضح است که عبارت $1-P_0-P_1$

مشخص کننده اندازه پله سوم می باشد.

^۸ در تعریف استاندارد، به اینورتری که قادر باشد در هر ربع سیکل K پله ولتاژی تولید کند، یک اینورتر $2K+1$ پله ای گفته می شود. از آنجایی که مبنای محاسبات در این فصل بر روی پله های ربع سیکل اول می باشد، ما نام اینورتر K پله ای را به اینورتری که در هر ربع سیکل K پله تولید می کند، اطلاق می کنیم.

به طریقی مشابه می توان برای اینورترهایی با تعداد پله های بیشتر روابط مشابهی استخراج کرد. به کمک اصل استقراء

ریاضی، برای اینورتر K پله ای رابطه b_n به صورت زیر خواهد بود: [۴]

$$b_n = \frac{4A}{n\pi} \left[\sum_{i=0}^{K-2} p_i \cos \frac{in\pi}{2k} + \left(1 - \sum_{i=0}^{K-2} p_i \right) \cos \frac{(k-1)n\pi}{2k} \right] \quad (7-2)$$

در رابطه بالا، P_i اندازه ولتاژ هر پله را نشان می دهد.

از آنجایی که هدف ما به حداقل رسانی مقدار THD است، بنابراین تابع هدف ترکیبی خواهد بود از معادله THD

و رابطه (۷-۴). بنابراین با قرار دادن رابطه (۷-۴) در رابطه (۱-۱) تابع هدف مورد نظر به صورت زیر حاصل می گردد:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left\{ \frac{4A}{n\pi} \left[\sum_{i=0}^{K-2} p_i \cos \frac{in\pi}{2k} + \left(1 - \sum_{i=0}^{K-2} p_i \right) \cos \frac{(k-1)n\pi}{2k} \right] \right\}^2}}{b_1} \quad (8-2)$$

معادله (۸-۴) تابع هدف برای مسأله خواهد بود اما نیاز به قیودی دارد تا فرایند بهینه سازی را امکان پذیر نماید. قید

اول ناشی از این مطلب است که مقادیر پله ها به صورت درصدی از دامنه موج است. بنابراین P_i باید مقادیری بین صفر

و یک اختیار کنند. از طرفی چون باید مجموع اندازه پله ها برابر مقدار دامنه باشد، پس مجموع مقدار P_i ها باید برابر

یک باشد. این امر سازنده قید دوم است. دو قید ذکر شده را می توان به سادگی در روابط (۴-۹) و (۴-۱۰) فرمول بندی

کرد:

$$0 < p_0, p_1, p_2, \dots < 1 \quad (9-2)$$

$$p_0 + p_1 + p_2 + \dots = 1 \quad (10-2)$$

تا اینجا، تابع هدف به همراه قیود مورد نظر فرمول بندی شدند. اکنون لازم است با الگوریتم های بهینه سازی، مقادیر بهینه

ها پیدا کنیم. این مطلب در بخش بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت P_i را برای