بررسی، تحلیل و مقایسه شاخص های جایگزین معرفی شده برای THD

محمد اسماعیل همدانی گلشن مسعود رادمهر

دانشگاه صنعتی اصفهان ، دانشکده برق و کامپیوتر، اصفهان، ایران

چکیده : یکی از پر کاربردترین شاخص های کیفیت توان، مجموع اعوجاج هارمونیکی (**THD**) است. علاوه بر ابهامات موجود در تعریف **THD** ، در بکارگیری این شاخص در برخی از شرایط کار نیز مشکلاتی بوجود می آید. به منظور رفع این ابهامات و مشکلات، در تعریف **THD** اصلاحاتی صورت گرفته و شاخص های جایگزینی معرفی شده اند. در این مقاله پس از مرور مختصر شاخص های جایگزین، آن ها بطور مفصل و از دیدگاه های مختلف مورد بررسی، تحلیل و مقایسه قرار می گیرند بطوریکه مشخص می شود که هر شاخص کدامیک از مشکلات و ابهامات متناظر با **THD** مرسوم را حل می نماید و هر کدام چه مشکلات جدیدی بوجود می آورند. در انتها نیز به عنوان جمع بندی و نتیجه گیری، ضمن مشخص کردن ویژگی های لازم شاخص جایگزین مناسب، یک شاخص برداری شامل کمیت های مختلف بصورت کلی پیشنهاد می شود که متناسب با شرایط سیگنال های جریان یا ولتاژ و کاربرد مورد نظر، با ترکیب مناسب این کمیت ها بر اساس معیار های معرفی شده در این مقاله، می توان به تحلیل وضعیت سیگنال پرداخت.

واژه های کلیدی : مجموع اعوجاج هارمونیکی، شاخص های جایگزین، سیگنال غیر تناوبی، سیگنال غیر ایستا، تبدیل فوریه، تبدیل موجک

Abstract : Total harmonic distortion (THD) is the most popular power quality index. Two problems with THD are ambiguities in its definition and utilization of it in some conditions. In order to solve these problems, a number of modifications have been suggested for THD definition and some new indices have been introduced. In this paper, these indices are briefly reviewed, then are investigated, analyzed and compared in view of different features. Thus, it is found that which ambiguities and problems can be solved by each index and which new problems are created by them. Finally, necessary requirements of a substitution index are described and a vector index including a number of suitable quantities are proposed. Regarding the voltage or current signal conditions and each special application, appropriate combinations of the quantities based on the introduced criterion in this paper can be used to analyze signals.

Keywords : Total harmonic distortion, substitution indices, non periodic signal, non stationary signal, Fourier transform, wavelet transform

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

۱- مقدمه

با توجه به پیچیدگی پدیده های فیزیکی، در بسیاری از موارد شاخص ها به عنوان کمیت هایی که کم و بیش شدت یک پدیده معین را منعکس می کنند، بکارگرفته می شوند. به عبارتی شاخص ها مکانیسمی برای فشرده کردن اطلاعات چند بعدی در یک کمیت واحد هستند. دلیل اصلی بکارگیری شاخص ها، آسانی محاسبه، استاندارد کردن تعاریف و کاربرد ساده آنها است. اما ممکن است شاخص ها اطلاعات مهمی را پنهان کنند، یا ممکن است بد بکارگرفته شوند (برای یک کاربرد معینی طراحی شده باشند ولی بطور غلط در کاربرد دیگری استفاده شوند) و در بسیاری از موارد برای حالت هایی بکارروند که خارج از کاربرد طراحی شده هستند. بنابراین رابطهٔ عکسی بین سادگی محاسبه و توانایی در نظر گرفتن جنبه های مختلف یک پدیده و همچنین اعتبار ریاضی شاخص ها وجود دارد[۱] .

شاخص های کیفیت توان نیز برای فشرده کردن اطلاعات مربوط به پدیده های پیچیده رخ داده در شکل موجهای جریان و ولتاژ در یک عدد واحد به کار می روند. این شاخص ها بطور عمده بر اساس تجربیات موجود در سیستم های قدرت، استدلال های فیزیکی وروش های ابتکاری و بدون پشتوانه قوی ریاضی پیشنهاد شده اند. این شاخص ها برای مهندسین قدرت دارای معنی فیزیکی هستند و استاندارد ها بر پایه آنها نوشته شده اند[۱و۲] . اغلب شاخص های کیفیت توان مهم، براساس فرض تناوبی بودن ولتاژ و جریان ها بسط یافته اند. این شاخص ها بطور معمول بر حسب مولفه اصلی و هارمونیک های سیگنال های ولتاژ و جریان، به منظور خلاصه کردن درجه اعوجاج یک موج سینوسی ومیزان تلفات توان حقیقی ناشی از این اعوجاج در یک عدد یگانه، تعریف شده اند[۳] . از جمله این شاخص ها که کاربرد زیادی دارد، THD است.

در عمل فرایند های کمی واقعا استاتیک هستند ودر اکثر حالات، جریان بارها متغّیر و غیر تناوبی است. بسیاری از بارهای صنعتی دارای جریان تناوبی نیستند. به عنوان مثال ، شکل موج جریان کوره های قوس الکتریکی نامنظم و غیر تناوبی است، به طوریکه نمی توان آن ها را توسط سری فوریه نمایش داد. ممکن است حتی آنها دارای طیف ایستا نیز نباشند. اینگونه جریان ها به آسانی توسط یک طیف فرکانسی مشخص نمی شوند و بنابراین شاخص هایی همچون THD را برای آنها نمی توان بکار برد[۴] .

بنابر این در شرایط وجود سیگنالهای غیرتناوبی، سیگنال های سه فاز نامتعادل و سیگنال های شامل هارمونیک های غیر صحیح، بسیاری از شاخص های کیفیت توان معنی فیزیکی خود را از دست می دهند و بعنوان یک مبنای مقایسه کارایی مطلوب را ندارند. واضح است که با توجه به اهمیت شاخص ها در تحلیل وضعیت موجود شبکه ها و مقایسه آنها با استانداردها و همچنین در طراحی سیستم های جدید، توانایی شاخص ها در ارائه اطلاعات وضعیت کار شبکه در همه شرایط، حائز اهمیت است. در صورت از دست رفتن کارایی شاخص های کیفیت توان در برخی شرایط، استانداردهای معمول برای آن ها کارایی لازم را نداشته و هیچگونه امکانی برای ارزیابی وضعیت سیستم وجود ندارد. برای حل این مشکل برخی از محققین شاخص های جدیدی را تعریف کرده اند که برای این گونه شرایط نیز کارایی داشته باشند [۲و۵و۶]. با وجود این تحقیقات، هنوز تصمیم واحدی در این زمینه وجود ندارد. نتیجه تحقیقات انجام شده در این زمینه و تحقیقاتی که در آینده صورت می گیرد، در اصلاح استانداردهای موجود می تواند بکار آید .

هدف این مقاله این است که پس از تحلیل مشکلات شاخص THD مرسوم، شاخص های جایگزین معرفی شده، بررسی و مشخص شود که توسط این شاخص ها کدامیک از این مشکلات حل می شود یا چه مشکلات جدیدی بوجود می آید و در نهایت با مقایسه جنبه های مختلف این شاخص ها پیشنهادی کلی در مورد بکارگیری شاخص های مرکب یا مجموعه ای از شاخص های ساده ارائه گردد. ویژگی ها و نوآوری های خاص کار تحقیقی ارائه شده در این مقاله عبارتند از:

الف- جمع آوری و مرور کلیه ابهامات در تعریف THD مرسوم و مشکلات بکارگیری آن

ب- جمع آوری و مرور شاخص های جایگزین پیشنهاد شده از مراجع مختلف

ج- بررسی و مقایسه جامع شاخص های جایگزین پیشنهادشده توسط روش های تحلیلی و شبیه سازی برای اولین بار

د- جمع بندی نتایج تحلیل، مشخص کردن ویژگی های لازم برای شاخص های جایگزین مناسب و ارائه پیشنهاد کلی یک شاخص بصورت برداری از کمیت های مناسب

در بخش دوم مقاله، شاخصTHD مرسوم معرفی می شود. در بخش سوم ابهامات و مشکلاتی که در استفاده از این شاخص وجود دارد، مورد بررسی قرار می گیرد. شاخص های

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳-No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

جایگزین که اخیرا" برای حل ابهامات و مشکلات مطرح شده دربخش سوم معرفی شده اند، در بخش چهارم ارائه و مورد بررسی قرار می گیرند. در نهایت و در بخش پنجم، با بررسی جوانب مختلف این شاخص ها و مزایا و معایب هر کدام، جمع بندی نهایی انجام و پیشنهاداتی برای بکارگیری شاخص های مناسب تر و استفادهٔ صحیح از شاخص THD مرسوم ارائه می شود.

۲- مجموع اعوجاج هارمونیکی (THD)

افزایش بارهای غیر خطی در سیستم های قدرت امروزی باعث افزایش مشکلات کیفیت توان شده است. مشخصه های ذاتی کار این بارها بگونه ای است که باعث خرابی کیفیت تغذیه می شوند. از طرف دیگر این نوع بارها به مقدار زیادی به کیفیت تغذیه حساس هستند[۷]. برای تحلیل و ارزیابی پدیده های کیفیت توان، بطور معمول از شاخص های کیفیت توان استفاده می شود.

THD، ضریب توان، ضریب نفوذ تلفن، فاکتور عدم تعادل و فاکتور فیلکر از جمله شاخص هایی هستند که بطور گسترده و عمومی مورد استفاده قرار می گیرند[۳]. برای ارزیابی وضعیت کیفیت توان، توسط این شاخص ها، درجه اعوجاج شکل موج سینوسی، میزان تلفات توان ناشی از این اعوجاج و اثر سیگنال های ولتاژ و جریان در مدارهای تلفن و مخابراتی بطور خلاصه توسط یک عدد در اختیار کاربر قرار می گیرد. شاخص های محاسبه شده با حدود توصیه شده در استانداردها، مقایسه می شوند[۱].

انواع مختلف منابع هارمونیکی همچون پل های تریستوری، کوره های قوس، ترانسفورماتورهای دارای اضافه تحریک و سیکلوکانورترها در شبکه های قدرت موجوداند [۸]. جریان های هارمونیکی باعث افزایش تلفات و درجه حرارت در تجهیزات می شوند. ولتاژ های هارمونیکی نیز می توانند باعث خرابی تجهیزات حساس همچون خازن ها شوند [۸]. به منظور محدود کردن این اثرات نامطلوب، استانداردهای بین المللی همچون IEC و IEEE از فرکانس های گسسته برای محاسبه شاخص THDطبق رابطه (۱) استفاده می کنند[۴].

$$THD = \left(\sqrt{\sum_{i=2}^{N} V_i^2} \right) / V_1 \qquad (۱)$$

که i مرتبه هارمونیک صحیح، V_1 اندازه ولتاژ فرکانس اصلی و V_i دامنه ولتاژ هارمونیک i ام هستند. در استانداردهای IEC۱۰۰۰-۲-۲ و IEEE مقدار N به ترتیب برابر با ۴۰ و بی نهایت تعریف می شود [۴]. THD نسبت محتوای انرژی هارمونیک ها به انرژی مولفه اساسی رابیان می‌کند. یکی از پرکاربردترین شاخص های کیفیت توان، THD است بطوری که بسیاری از شرکت های برق برای جریان های بار مصرف کننده ها محدودیت هایی رابر مبنای THD در نظر گرفته اند. به علاوه کیفیت مبدل های توان بر حسب THD جریان آنها مطالعه شده است.

۳-ابهامات و مشکلات عملی حاصل از تعریف THD

در ابتدای این بخش تعریفی از اصطلاحات سیگنال غیر تناوبی ، شبه تناوبی ، گذرا و غیر ایستا که در ادامه مقاله بطور مکرر بکار می روند، ارائه می شود.

اگر برای سیگنال $v(t)$ یک مقدار T محدود نتوان یافت بطوری که برای همه t ها رابطه $v(t) = v(t+T)$ برقرار باشد، گفته می شود سیگنال $v(t)$ یک سیگنال غیر تناوبی است. اگر مشخصات سیگنال با زمان تغییر کند، سیگنال گذرا است. برای مثال سیگنال های سینوسی میرا شونده که پس از اتصال کوتاه روی ماشین های AC حاصل می شوند یا سیگنالهای حاصل از کلیدزنی خازن، سیگنال های گذرا هستند. اگر سیگنال $v(t)$ از چند مولفه تناوبی $v_1(t), v_2(t), \ldots\ldots$ تشکیل شود اما مجموع این مولفه ها تناوبی نباشد آنگاه $v(t)$ شبه تناوبی است. عبارت غیر ایستا به این معنی است که نمایش حوزه فرکانس یک پنجره از سیگنال به فاصله زمانی ارزیابی طیف بستگی دارد [۹] .

در ادامه ابهامات موجود در تعریف THD و اشکالات کاربرد آن در برخی از شرایط را مرور می نماییم:

الف) یکی از موارد ابهام در تعریف THD مربوط به حالت هایی است که سیگنال دارای هیچگونه مولفه اصلی نیست [۲].

به عنوان مثال دامنه مولفه اصلی(مولفه با فرکانس ω_0) برابر صفر است.

$$i(t) = Cos(3\omega_o t) + Cos(5\omega_o t) \qquad (۲)$$

طبق تعریف ، مقدار THD در این حالت بی نهایت شده و این سئوال مطرح می شود که THD برابر با بی نهایت چه اطلاعاتی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

در مورد میزان انرژی هارمونیک های موجود در سیگنال ارائه می کند؟ در عمل این حالت زمانی رخ می دهد که ولتاژها و جریان های فرکانس قدرت بواسطهٔ کلید زنی زیر سنکرون یا بوسیله اعوجاج سیگنال درکنترل‌های استفاده شده برای استراتژیهای کلید زنی، مدوله می شوند[۲].

یک راه برای اجتناب از این مشکل، استفاده از تعاریف دیگر همچون شاخص اعوجاج، تعریف شده به صورت (۳) است.

$$DIN = \left[\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}\right] \Big/ \left[\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2}\right] \qquad (۳)$$

شاخص اعوجاج در مراجع قدیمی اروپایی مثل استانداردهای قدیمی IEC و اخیرا در استاندارد آلمان ظاهر شده است. مشکل اصلی استفاده از DIN به جای THD به موضوع استاندارد کردن مربوط می شود. IEEE و بسیاری از سازمان های بین المللی دیگر استفاده از THD را به جای DIN ترجیح داده اند[۲].

ب) هنگامی که هدف تحلیل اعوجاج هارمونیکی مجموع جریان سه فاز (برای مثال جریان سیم نوترال) است، با توجه به اینکه دامنه مولفه فرکانس اصلی این جریان صفر است همان مشکل حالت (الف) رخ می دهد.

ج) اغلب شاخص های کیفیت توان همچون همچون THD، TIF، C-Message، حاصلضرب IT، حاصلضرب VT وفاکتور K برای سیگنال های تناوبی تعریف شده اند. به عنوان مثال THD اساسا نسبت محتوی انرژی هارمونیک ها به انرژی مولفه اصلی است. با این وجود بسیاری از سیگنال هایی که در سیستم قدرت وجود دارند از جمله جریان لامپ های فلورسنت و سایر بارها با جریان مدوله شده، تناوبی نیستند. به عنوان مثال جریانی که دارای مولفه فرکانس اصلی است را در نظر بگیرید و فرض کنید در همان مدار جریانی دیگر که فرکانس اش ضریب کسری از فرکانس قدرت نیست القا شده باشد. بنابراین جریان مدار شامل دو مولفه بصورت زیر است :

$$i(t) = ACos(\omega_o t) + BCos(\sqrt{2}\omega_o t) \qquad (۴)$$

این سیگنال یک سیگنال غیر تناوبی است. در حالتی که سیگنال های ولتاژ وجریان غیر تناوبی هستند، تعریف مشخصی از هارمونیک وجود ندارد بنابراین استفاده از THD با مشکل روبرو می شود [۲].

د) یکی از نواقص شاخص THD این است که در آن به همه فرکانس ها بطور یکسان وزن داده می شود. برای مثال اگر یک جریان فقط شامل هارمونیک سوم باشد ویا فقط شامل مثلا هارمونیک ۴۷ باشد ودرصد این هارمونیک ها برابر باشند، آنگاه THD هر دو سیگنال برابر است. اما این سیگنال ها دارای اثرات بسیار متفاوتی روی سیستم های قدرت هستند. بطور کلی فرکانس های بالاتر، تلفات مغناطیسی بزرگتری را تولید می کنند و راکتانس های متقابل بزرگتر متناظر با آنها بیانگر آن است که فرکانس های بالاتر دارای اثر بیشتری روی سیستم های قدرت هستند. تاثیر بیشتر فرکانس های بالاتر در THD منعکس نمی شود[۲].

ه) ابهام دیگر در بکارگیری شاخص THD در مدارهای سه فاز، نحوه استفاده از جریان فازها در رابطهٔ THD است. به عبارتی سئوال مهم، نحوهٔ بکارگیری شاخص های کیفیت توان برای شبکه های سه فاز است. یک امکان، محاسبه سه شاخص فاز متناظر با ولتاژهای فاز به نوترال وجریان های فاز و یک شاخص چهارم برای ولتاژ نوترال به زمین و جریان نوترال است. امکان دیگر کار کردن با مولفه های متقارن و در نظر گرفتن شاخص های مربوط به مولفه های توالی مثبت ومنفی بصورت رابطه (۵) است [۲]:

$$THD_{balanced} = \sqrt{THD_{+}^2 + THD_{-}^2} \qquad (۵)$$

بطور مشابه THD باقیمانده را می توان از جریان یا ولتاژ توالی صفر محاسبه نمود. مزیت این نوع تجزیه آن است که میتوان تاثیر بیشتر مؤلفه های توالی صفر را مشخص و از تاثیر سیگنال های توالی مثبت و منفی کم اثرتر (با اثر تخریبی کمتر) جدا نمود. با استفاده از THD باقیمانده و THD مربوط به مولفه های توالی مثبت ومنفی می توان THD مجموع را بصورت رابطه (۶) تعریف نمود [۲].

$$THD_{total} = \sqrt{THD_{residual}^2 + THD_{balonced}^2} \qquad (۶)$$

و) با توجه به مقادیر متفاوت N در تعریف THD در استانداردهای IEC و IEEE ابهام دیگر آن است که برای بدست آوردن اطلاعات کافی در محاسبه THD تا چه مرتبه هارمونیکی باید در نظر گرفته شود .

ز) در استانداردهای IEEE و IEC هیچ محدودیتی برای میان هارمونیک ها در نظر گرفته نشده است. با توجه به تاثیرات مهم میان هارمونیک ها لازم است محدودیت مربوط به مولفه های

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳-No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

جداگانه و همچنین روابط دقیق تری برای محاسبه THD، پیشنهاد گردد .

ح) THD فقط روی اندازه هارمونیک های موجود در شکل موج بنا می شود بطوری که هیچگونه اطلاعاتی درباره زوایای فاز هارمونیکها بدست نمی دهد. به عبارتی دو سیگنال که دارای هارمونیک های با اندازهٔ یکسان ولی فاز متفاوت هستند توسط THD قابل تشخیص نیستند.

ط) THD بر اساس تخمین طیف هارمونیکی سیگنال توسط تبدیل فوریه محاسبه می شود. بنابراین نواقص و محدودیت های تبدیل فوریه، بخصوص در حالت هارمونیک های غیر ثابت و متغییر با زمان، روی THD محاسبه شده تاثیر می گذارد.

۴-شاخص های پیشنهاد شده جایگزین برای THD

به منظور رفع پاره ای از ابهامات موجود در تعریف شاخص THD و همچنین مشکلات بکارگیری آن در شرایط کار مختلف، برخی محققین در تعریف این شاخص اصلاحاتی را پیشنهاد و شاخص های جدیدی معرفی نموده اند. در این بخش شاخص های پیشنهادی جایگزین را معرفی و مورد بررسی قرار می دهیم.

۴-۱- شاخص THD۱

هدف از شاخص THD آن است که نسبت توان سیگنال در فرکانس های غیر فرکانس اصلی به توان فرکانس قدرت سنجیده شود. بنابراین می توان THD را به صورت (۷) تعریف کرد [۲]:

$$THD1 = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \qquad (۷)$$

با توجه به قضیه پارسوال، ریشه متوسط مربعات سیگنال های تناوبی و غیر تناوبی را طبق رابطه (۸) می توان محاسبه نمود.

$$I_{rms} = \lim_{T\to\infty} \sqrt{\frac{\int_0^T i^2(t)dt}{T}} \qquad (۸)$$

به این ترتیب همه عبارت های موجود در طیف سیگنال را می توان در نظر گرفت. با استفاده از معادله (۷) سیگنال های غیر تناوبی همچون نویز، میان هارمونیک ها، سیگنال های آشوب و سایر ولتاژ ها وجریان های غیر هارمونیکی و غیر تناوبی قابل تحلیل اند، در صورتی که با استفاده از تعریف مرسوم THD نمی توان مشخصات این نوع سیگنال ها را استخراج نمود.. در حالتی که سیگنال تناوبی است مقدار محاسبه شده از رابطه (۷) و تعریف THD مرسوم برابر می شوند. با استدلال مشابه، شاخص DIN را می توان به صورت (۹) تعریف کرد.

$$DIN1 = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_{rms}} \qquad (۹)$$

۴-۲- شاخص STHD

در عمل فرایند های بسیار محدودی استانیک هستند و عموما جریان بار، یک سیگنال غیر تناوبی و متغیر با زمان است. در بسیاری از پدیده های گذرا نیز جریان حاصل یک جریان متغیر بازمان و غیر ایستا است. بنابراین روش مناسب آن است که شاخص های کیفیت توان متناظر نیز بر حسب مولفه های سیگنال که توابعی از زمان هستند، بیان شوند. این کار توسط سری فوریه که فقط برای سیگنال های تناوبی تعریف می شود، قابل انجام نیست. به این منظور تعاریف اصلاح شده شاخص های کیفیت توان مبتنی بر تبدیل فوریه کوتاه مدت پیشنهاد شده اند [۶].

ایده اصلی تبدیل فوریه کوتاه مدت (WFT) ، ضرب سیگنال ورودی x(t) دریک تابع پنجره W(t) است که مکان آن با زمان تغییر می کند. به عبارتی سیگنال به بخش های کوتاه مدت تقسیم شده وتبدیل فوریه به هر بخش اعمال می شود. به این طریق، هر طیف فرکانس، محتوی فرکانسی را در طی یک زمان کوتاه مدت نشان می دهد. مجموع اینچنین طیفی شامل تغییر محتوی فرکانسی با زمان است. تبدیل فوریه گسسته زمان کوتاه به صورت (۱۰) تعریف می شود.

$$WDFT(K,m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s)W(n-m)e^{-j\Omega T_s nk} \qquad K = 0,1,2,\cdots,N-1 \qquad (۱۰)$$

که N تعداد نمونه ها، T فاصله زمانی بین نمونه ها و $\Omega = \frac{2\pi}{NT_s}$ فاصله بین مولفه ها در حوزه فرکانس است. بطور معمول تابع پنجره $W(n-m)$ مورد استفاده، تابع پنجره مستطیلی است که پهنای پنجره در طول زمان ΔT، مقدار تابع در این پهنا برابر یک و در بقیه زمان ها صفر است. m شماره

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳- No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

نمونه ای است که پنجره از آن شروع می شود. WFT مشخص می کندکه کدام مولفه های فرکانسی و در چه زمان هایی در سیگنال موجود اند. در حالیکه WFT و مشابه گسسته آن امکان می دهد تا روی پدیده های زمانی تمرکز کنیم، این تبدیلات همیشه، همه خواص مفید تبدیل فوریه (یا فوریه گسسته) را در برندارند. به این دلیل لازم است شاخص های کیفیت توان مبتنی بر WFT بطور دقیق بررسی شوند. طول زمان هر پنجره (ΔT) یعنی دقت زمانی WFT و دقت فرکانس طیف (Δf) بصورت زیر با هم مرتبط هستند.

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta T} \qquad (۱۱)$$

بنابراین یک پنجره باریک ، دقت زمانی خیلی خوب و دقت فرکانسی ضعیف را نتیجه می دهد وبرعکس.

شاخص اعوجاج هارمونیکی کوتاه مدت (STHD) بر مبنای مفهوم تبدیل فوریه کوتاه مدت تعریف شده است. هدف از این تعریف، پیشنهاد شاخص جدیدی است که در حالت دائم سینوسی که ضرایب صحیح فرکانس قدرت f_0 موجود اند، به THD مرسوم تبدیل می شود. به علاوه ، شاخص جدید باید با مفهوم اساسی قضیه پارسوال تطبیق داشته باشد. در قضیه پارسوال، محتوای انرژی مولفه های غیر f_0 دربسطی مشابه با بسط سری فوریه برای یک سیگنال معین، ریشه مجموع مربعات مولفه های غیر f_0 است. هدف دیگر استفاده از نتایجWFT به جای مولفه های حاصل ازتبدیل فوریه در رابطه ای مشابه با تعریفTHD معمولی است. شاخص جدید شامل اطلاعات همه مولفه های فرکانسی مختلف موجود و نه فقط مولفه های هارمونیکی است واین شاخص می تواند برای مشخص کردن سیگنال های تناوبی و همچنین غیر تناوبی استفاده شود. شاخص اعوجاج هارمونیکی کوتاه مدت (STHD) برای هرپنجره از سیگنال مورد نظر بر مبنای تبدیل فوریه کوتاه مدت، بصورت زیر تعریف شده است [۶]:

$$STHD = \frac{\sqrt{\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq 1\left(f_0/\Delta f\right)+1}}^{Nf} WDFT_i^2}}{WDFT_{\frac{f_0}{\Delta f}+1}} \qquad (۱۲)$$

که N_f تعداد فرکانس هایی است که توسط WFT استخراج می شوند و Δf دقت فرکانسی را نشان می دهد.

تبدیل فوریه کوتاه مدت امکان لحاظ کردن انرژی مولفه های موجود در سیگنال که تحت عنوان میان هارمونیک ها یا زیر هارمونیک ها قرار می گیرند را فراهم می کنند. البته با توجه به اینکه تبدیل فوریه کوتاه مدت، مولفه های هارمونیکی فرکانس اساسی تعریف شده بوسیله طول پنجره ΔT را محاسبه می کند، همه مولفه های سیگنالی که دارای طیف پیوسته است، قابل استخراج نیست. بنابراین STHD تقریبی از محتوی انرژی واقعی سیگنال را تخمین می زند.

در [۶] مطالعه ای در رابطه با قضیه پارسوال و استفاده از شاخص STHD برای اندازه گیری تلفات توان حقیقی انجام و به عنوان نتیجه ای از این مطالعه، نشان داده شده است که هر چه تلفات بزرگتر باشد، STHD نیز بزرگتر است. این نتیجه ای از قضیه پارسوال است و غیر تناوبی بودن یا آشوب در سیگنال جریان این خاصیت را تغییر نمی دهد. در کار تحقیقی فعلی نیز طی مطالعه ای ساده جریان های با درجه اعوجاج مختلف از یک مقاومت ۱Ω عبور داده شده است. در جدول (۱) ، مشخصات جریان ها، STHD آن ها و تلفات تولید شده در مقاومت ۱Ω ارائه شده اند. مشاهده می شود که هر چه تلفات توان در مقاومت ۱Ω بیشتر باشد ، STHD متناظر نیز بزرگتر است.

تبدیل فوریه کوتاه مدت باید اطلاعات فرکانس اصلی ۵۰Hz را آشکار کند. پس دقت فرکانسی باید به گونه‌ای باشد که مقدار مولفه فرکانس قدرت قابل محاسبه باشد . بنابراین حداقل مقدار (ΔT) برابر $\frac{1}{50}$ ثانیه است. حد بالای (ΔT)، توسط توانایی انجام محاسبات و طول سیگنالی که تبدیل فوریه روی آن انجام می شود، تعیین می گردد. هر چه اندازه پنجره (ΔT) بزرگتر باشد، مقدارSTHD نیز بیشتر می شود زیرا انرژی مولفه های با فرکانس بسیار کوچک در نظر گرفته می شوند. بعد از یک سطح آستانه، مقدار STHD دیگر افزایش نمی یابد زیرا اطلاعات همه فرکانس های موجود در نظر گرفته شده است و دقت فرکانسی بیشتر، اطلاعات بیشتری را در مورد سیگنال فراهم نمی کند.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳- No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

۴-۳- شاخص THD۲

می توان فرکانس قدرت (و بنابراین مولفه اصلی) سیگنال را مشخص وسپس با استفاده از بخش باقیمانده سیگنال، یک شاخص مشابه با THD بصورت زیر تعریف کرد[۵] .

$$THD2 = \frac{E(i(t) - i_0 Cos(w_o t))}{i_0} \qquad (۱۳)$$

مولفه فرکانس قدرت با ωo مشخص می شود و E(.) به معنی انرژی سیگنال زمانی است. این شاخص می تواند در حالت تناوبی وغیر تناوبی بکاررود و در حالت تناوبی مقدار آن با THD مرسوم برابر می شود.

۴-۴- شاخص THD۳

در[۴] مجموع اعوجاج هارمونیکی بصورت زیر تعریف شده است:

$$THD3 = \frac{V_{Trms}}{V_{1rms}} \qquad (۱۴)$$

که V_{1rms} مقدار موثر مولفه اساسی شکل موج است و از رابطه (۱۵) بدست می آید:

$$V_{1rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_1(t)dt} \qquad (۱۵)$$

V_{Trms} نیزمقدار rms سیگنال است که از رابطه (۱۶) بدست می آید:

$$V_{Trms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V(t)dt} \qquad (۱۶)$$

در[۴]پیشنهاد شده است که T برابر با یک پرید مولفه اصلی انتخاب شود یعنی $T = \frac{1}{f_0}$.

۴-۵- شاخص THD۴ با استفاده از ضرایب تبدیل موجک

بطور معمول از تکنیک تبدیل فوریه برای استخراج طیف شکل موج های سیستم قدرت استفاده می شود. برای اطمینان از دقت تبدیل فوریه، شکل موج مورد تحلیل باید تناوبی و ایستا باشد، قاعده نایکویست برقرار باشد و طول پنجره ضریب صحیحی از پرید اصلی شکل موج باشد. با توجه به این شرایط و غیر ایستا بودن شکل موج های سیستم قدرت، تبدیل فوریه نمی تواند مقدار صحیح محتوی هارمونیکی شکل موج را ارائه و گذراهای ناگهانی در سیگنال را مشخص کند.

از طرف دیگر تبدیل موجک دارای ویژگی قوی تحلیل در حوزه زمان – فرکانس برای سیگنال های غیر ایستا است. تبدیل موجک دارای پتانسیل قوی برای ارزیابی کار آمد طیف شکل موج های غیر تناوبی و متغیر با زمان است و دارای نقاط ضعف تبدیل فوریه نیست. بنابراین می توان شاخص های کیفیت توان مبتنی بر تبدیل موجک را مشابه با شاخص های کیفیت توان مبتنی بر تبدیل فوریه، تعریف نمود. علیرغم شباهت بین دو مجموعه شاخص ها، شاخص های مبتنی بر موجک می توانند دقیق ترو واقعی تر بوده و خواص شکل موج هارا بهتر مشخص نمایند.

با استفاده از تحلیل سیگنال از طریق تبدیل موجک، ضرایب موجک برای باندهای فرکانسی مختلف موجود در سیگنال بدست می آیند. اندازه ضرایب به سطح تجزیه بستگی دارد . شاخص مشابه با THD به صورت جذر نسبت مجموع مربعات همه ضرایب وزن داده شده جزئیات سیگنال به مجموع مربعات ضرایب وزن داده شده بالاترین سطح (مربوط به کوچکترین باند فرکانسی) تعریف شده است[۳].

$$THD4 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1}\sum_{K=1}^{Nj} 2^{j-1} d_j^2(k)}{\sum_K 2^{m-1} a_m^2(k)}} \qquad (۱۷)$$

K مقدار ضرایب در یک سطح ویژه j است. تعداد سطوح تجزیه شده m است. $j=1$ متناظر با پایین ترین سطح (بالاترین فرکانس های موجود در سیگنال) و $j=m$ متناظر با بالاترین سطح (تقریب هموار سیگنال) است. با تعریفTHD۴ در واقع اندازه‌ای از محتوی فرکانس بالای یک سیگنال نسبت به مولفه اساسی ومولفه های موجود در باند فرکانسی با کمترین فرکانس بدست می آید. بنابراین از نظر مفهوم به THD مرسوم نزدیک است. از طرفی همانگونه که در معادله (۱۷) نشان داده شده است به ضرایب مربوط به هر سطح وزن داده شده است. هر چه سطح بالاتر رود ، ضرایب مربوط دارای وزن بزرگتری هستند. به عبارتی به مولفه های فرکانسی مرتبه پایین تر وزن بیشتری داده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

۴-۶- شاخص کیفیت توان جامع برای شکل موج های غیر تناوبی

در [۱۰] یک شاخص کیفیت توان جامع (مشابه با THD که برای هارمونیک ها بکار می رود) برای امکان مقایسه اثراتی که عوامل مختلف روی کیفیت توان دارند، پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه بسیاری از وسایل به تغییرات rms ولتاژ حساس هستند، سطح rms ولتاژ می تواند شاخص مناسبی باشد. با این وجود rms یک شاخص جامع خوب نیست زیرا همه اطلاعات کیفیت توان را در بر ندارد. برای مثالrms یک شکل موج ولتاژ غیر سینوسی شامل مولفه اصلی ۲۲۷/۷ ولت و هارمونیک پنجم ۲۲/۷ ولت با rms یک شکل موج سینوسی ۲۳۰ ولتی برابر است. در حالی که هارمونیک پنجم در سیگنال غیر سینوسی ۱۰٪ مولفه اصلی و THD آن برابر ۱۰٪ است. به همین علت شاخص جامعی، بصورت خطای rms(RMSE) بین شکل موج ولتاژ اصلی ایده آل و شکل موج ولتاژ واقعی تعریف شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (V_s - V_i)^2}{N}} \qquad (۱۸)$$

که V_s نمونه های ولتاژ، V_i ولتاژ ایده آل و N تعداد نمونه ها را نشان می دهند.شاخص RMSE برای طول پرید اصلی محاسبه می شود. اگر شکل موج ایستا باشد، به شرط اینکه پرید مشاهده اولیه ضریب صحیحی از کوچکترین فرکانس موجود باشد، با دو برابر کردن پرید مشاهده، مقدار شاخص RMSE تغییری نمی کند.

شاخص RMSE به سطح ولتاژ بستگی دارد. با استفاده از RMSE نرمالیزه شده (NRMSE) مقایسه سطوح ولتاژ مختلف امکان دارد .RMSE نرمالیزه شده بصورت زیر تعریف می شود.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_s - V_i)^2}{N}}}{V_1} \qquad (۱۹)$$

که V_1 اندازه ولتاژ اصلی را نشان می دهد.

RMSE و RMSEN شاخص های مفیدی برای مشخص کردن کیفیت توان هستند زیرا آنها همه وقایع کیفیت توان گذرا و حالت دائم همچون هارمونیک ها، کاهش و افزایش ولتاژ، اعوجاج شکل موج گذرا، نوسان های فرکانس و میان هارمونیک ها و فرکانس های غیر هارمونیکی (مثل فیلکر) را در نظر می گیرند. اگر مقدار این شاخص کوچک باشد به تحلیل های دقیق تری نیاز نیست، در غیر این صورت باید تحلیل های دقیق تری برای تعیین طبیعت مشکل کیفیت توان انجام داد. از جمله ویژگی های این شاخص آن است که اگر فقط هارمونیک ها موجود باشند مقدار NRMSE با مقدار THD برابر می شود. به علاوه مقدار شاخص برای همه مسائل کیفیت توان غیر صفر است. یکی از معایب این شاخص، نیاز آن به مولفه اصلی سیگنال نیاز است که باید توسط روش هایی تخمین زده شود.

۵-بررسی و تحلیل شاخص های جایگزین پیشنهاد شده برای THD

در این بخش شاخص های جدیدی که به عنوان جایگزینی برایTHD مرسوم معرفی شده اند را مورد بررسی، تحلیل و مقایسه قرار می دهیم. در این بررسی ها مشخص می شود که هر شاخص کدامیک از مشکلات و ابهامات متناظر با THD مرسوم را حل می نماید و کدام مشکل همچنان پابرجا است. در نهایت به عنوان نتیجه گیری پیشنهادی در مورد جایگزین مناسب برای شاخص THD مرسوم ارائه می شود.

۵-۱- تحلیلی بر تعریف انواع شاخص ها

الف) برای محاسبهٔ THD۱ تعریف شده به صورت رابطهٔ (۷)، میزان انرژی موجود در سیگنال از طریق تعیین مربع مقدار rms سیگنال محاسبه و میزان انرژی موجود در مؤلفهٔ اساسی سیگنال بوسیله مربع rms این مؤلفه بدست می آید. اختلاف این دو، محتوی انرژی سیگنال مربوط به سایر مؤلفه های موجود در سیگنال به جز مؤلفه اصلی آن را نشان می دهد. به این ترتیب این انرژی به هارمونیک ها محدود نمی شود و کلیهٔ طیف فرکانسی موجود در سیگنال را در بر می گیرد. برای محاسبه rms سیگنال از رابطه (۸) استفاده می شود.اگر برای محاسبهٔ این کمیت ازنمونه های زمانی شکل موج استفاده شود، اطلاعات مربوط به زاویه فاز مؤلفه های فرکانسی مختلف علاوه بر اندازهٔ این مؤلفه ها در نظر گرفته می شود. پارامتر T (دوره انتگرال گیری) مشخص می کند که انرژی کدام یک از مؤلفه های فرکانسی در محاسبهٔ انرژی سیگنال لحاظ می شود. هرچه T بزرگتر باشد اطلاعات مؤلفه های با فرکانس پایین تر بطور کامل در محاسبهٔ انرژی سیگنال دخالت داده می شود. در صورت وجود محدودیت روی اندازهٔ T،

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳-No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

بویژه در جاهایی که بواسطه تغییرات سریع سیگنال لازم است انرژی سیگنال بصورت تابعی از زمان محاسبه شود، ممکن است اطلاعات برخی از فرکانس های پایین در نظر گرفته نشود. در صورتی که محتوی فرکانسی سیگنال با زمان تغییر کند، می توان با تغییر موقعیت پنجره نمونه های سیگنال، THD۱ متغیر با زمان را محاسبه نمود. اگر برای محاسبهٔ rms سیگنال، ابتدا اندازهٔ مؤلفه های مختلف سیگنال استخراج شود و از طریق مجموع مربعات این اندازه ها، مقدارrms آن محاسبه شود، علاوه بر اینکه مقدار تقریبی rms بدست می آید، مشکل در نظر نگرفتن زاویه فاز مؤلفه های فرکانسی و محدودیت های نحوهٔ استخراج این مؤلفه ها همچنان باقی است.

در هر دو نحوهٔ محاسبهٔ rms سیگنال، مشکلات مربوط به وزن دهی یکسان به مؤلفه های مختلف و همچنین محاسبهٔ THD۱ در مدارهای سه فاز شامل بیش از یک کمیّت ولتاژ ویک کمیّت جریان همچنان باقی است. از طرفی چون THD۱ به صورت نسبت تفاوت انرژی مؤلفه اصلی به rms مقدار اصلی سیگنال تعریف شده است، در صورت کوچک بودن I۱ یا صفر بودن آن، مقدار THD بسیار بزرگ می شود که معنی فیزیکی خاصی ندارد.

ب) در شاخص STHD ، ابتدا اندازهٔ مؤلفه های مختلف سیگنال بوسیلهٔ تبدیل فوریهٔ کوتاه مدت محاسبه شده و سپس برای یافتن انرژی سیگنال مربوط به مؤلفه های غیر از مؤلفه با فرکانس f_0 ، به توان دو رسیده و با هم جمع می شوند. جذر این مجموع بر اندازهٔ مؤلفه فرکانس f_0 تقسیم می شود. به این ترتیب STHD مشابه با THDمرسوم نسبت انرژی مؤلفه های اغتشاش را به انرژی مؤلفه اصلی محاسبه می کند با این تفاوت که با توجه به طول پنجره T و تعداد نمونه های گرفته شده در این پنجره می توان علاوه بر هارمونیک ها، انرژی میان هارمونیک ها و مؤلفه DC را هم لحاظ کرد. از طرفی با حرکت پنجره تبدیل فوریه کوتاه مدت، STHD متغیر با زمان به صورت تابعی از زمان بدست می آید. در این روش همچنان محدودیت های تبدیل فوریه می تواند مشکل ساز باشد. از طرفی مشکلاتی همچون عدم وجود مؤلفه فرکانس f_0 در شکل موج، وزن دهی یکسان به همهٔ مؤلفه ها، عدم در نظر گرفتن حالت سه فاز، مشخص نشدن تعداد نمونه های مناسب در هر پنجره تبدیل فوریه کوتاه مدت، همچنان باقی است.

ج) THD۲ تعریف شده در معادله (۱۳) نیز نسبت انرژی سیگنال اغتشاش (تفاوت سیگنال اصلی و مؤلفه اصلی سیگنال) به پیک یا rms مؤلفهٔ اصلی است. تفاوت این تعریف، با تعریفTHD۱ در آن است که اولاً در اینجا صورت رابطه، انرژی سیگنال اغتشاش و در تعریفTHD۱ صورت تفاوت انرژی سیگنال اصلی و انرژی مؤلفه اصلی سیگنال است. از طرفی در مورد نحوه محاسبه انرژی نیز روشی بیان نشده است.

د) در تعریف (۱۴) صورت نشان دهندهٔ انرژی کل سیگنال است. بنابراین تفاوت این تعریف نسبت به تعاریف قبل در آن است که نسبت انرژی کل سیگنال به انرژی مؤلفه اصلی ونه نسبت انرژی مربوط به مؤلفه های اغتشاش به انرژی مؤلفه اصلی به عنوان THD تعریف شده است. با توجه به اینکه اندازه THD۳ تعریف شده عددی بزرگتر از ۱ است، عدد حاصل معنی روشنی در رابطه با مؤلفه های اغتشاش به همراه ندارد. از طرفی برای محاسبه rms سیگنال اصلی پیشنهاد شده است که T برابر با یک پریود باشد. این انتخاب باعث می شود میان هارمونیک ها و زیر هارمونیک ها در نظر گرفته نشوند.

ه) در THD۴ تعریف شده بوسیلهٔ رابطهٔ (۱۷) نیز بگونه ای نسبت انرژی مؤلفه های اغتشاش به انرژی در سطح هموار تبدیل موجک محاسبه می شود. با توجه به اینکه این تعریف بر ضرایب موجک بنا می شود، مشکلات همراه با تبدیل فوریه وجود ندارد. از طرفی برای باندهای فرکانسی مختلف وزن هایی در نظر گرفته شده است. البته نحوه وزن دهی می تواند مورد اشکال باشد. به عبارتی سئوالی که مطرح است این است که چرا به فرکانس بالاتر وزن کمتری و به فرکانس های پایین تر وزن بیشتری داده شده است. مشکل حالت هایی که در آن اندازهٔ مؤلفهٔ اصلی سیگنال صفر است در این تعریف حل شده است زیرا در مخرج رابطه، انرژی نه یک مؤلفه بخصوص بلکه انرژی مؤلفه های موجود در بالاترین سطح تجزیه در نظر گرفته شده است. البته این می تواند مشکل دیگری ایجاد کند و آن چنین است که در صورتی که سیگنال فقط شامل مؤلفه هایی در سطح هموار باشد آنگاه مقدار THD حدود صفر خواهد بود که با واقعیت متفاوت است.

و) شاخص NRMSE معرفی شده در معادله (۱۸) شباهت زیادی به شاخص معرفی شده در تعریف (۱۴) دارد. به عبارتی یک نوع محاسبهٔ انرژی سیگنال اغتشاش (اختلاف سیگنال اصلی با مؤلفه اصلی سیگنال) در این معادله پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه برای محاسبه NRMSE از نمونه های زمانی سیگنال استفاده می شود، بسیاری از مزایای توضیح داده شده در ابتدای این بخش از جمله لحاظ زاویه فاز مؤلفه های مختلف فرکانسی بدست می آید. این شاخص و شاخص های مشابه هر گونه اغتشاشی در

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

سیگنال و انحراف آن از مقدار نامی را در نظر می گیرند و بنابر این تنها نمایانگر هارمونیک های دائمی موجود در سیگنال نیستند.

۵-۲- مقایسهٔ شاخص های مختلف از طریق شبیه سازی

برای مقایسهٔ THD مرسوم و شاخص های جایگزین پیشنهاد شده، پنج سیگنال که شامل مؤلفه های فرکانسی متفاوت را در نظر می گیریم و تلفاتی که این سیگنال ها در یک مقاومت ۱Ω ایجاد می کنند و همچنین مقادیر شاخص های مختلف را برای آن ها محاسبه و مورد مقایسه قرار می دهیم.

سیگنال اول (شامل مولفه اصلی به همراه هارمونیک های دوم، سوم و پنجم):

$$y = \sin(100\pi t) + 0.25\times\sin(2\times100\pi t) + 0.1\times\sin(3\times100\pi t) + 0.05\times\sin(5\times100\pi t)$$

سیگنال دوم(شامل مولفه اصلی به همراه هارمونیک های دوم، سوم و یازدهم):

$$y = \sin(100\pi t) + 0.25\times\sin(2\times100\pi t) + 0.1\times\sin(5\times100\pi t) + 0.05\times\sin(11\times100\pi t)$$

سیگنال سوم(شامل مولفه اصلی به همراه تعدادی زیرهارمونیک ها):

$$y=\sin(100\pi t)+0.1\times\sin(0.7\times100\pi t)+0.05\times\sin(0.5\times100\pi t)+0.02\times\sin(0.2\times100\pi t)$$

سیگنال جهارم(شامل مولفه اصلی به همراه تعدادی میان هارمونیک ها):

$$y = \sin(100\pi t) + 0.2\times\sin(2.5\times100\pi t) + 0.1\times\sin(5.2\times100\pi t) + 0.05\times\sin(13.1\times100\pi t)$$

سیگنال پنجم(شامل مولفه اصلی به همراه هارمونیک سوم، یک مولفه زیر هارمونیک و یک مولفه میان هارمونیک):

$$y = \sin(100\pi t) + 0.3\times\sin(0.5\times100\pi t) + 0.15\times\sin(3\times100\pi t) + 0.05\times\sin(7.5\times100\pi t)$$

چهار حالت شبیه سازی زیر روی این سیگنال ها صورت گرفته است:

۱- فرض می شود سیگنال ها ایستا بوده و طول پنجره بگونه ای انتخاب می شود که اطلاعات همهٔ مولفه های فرکانسی را در بر داشته باشد.

۲- همان حالت ۱ به جز اینکه مولفه اصلی را از همه سیگنال ها حذف می کنیم.

۳- فرض می کنیم سیگنال ها غیر ایستا هستند، به عبارتی مولفه های فرکانسی در یک زمان معین شروع و درزمان مشخص دیگر خاتمه یابند.

۴-فرض می کنیم زاویهٔ فاز مولفه های مختلف تشکیل دهندهٔ سیگنال ها، با هم متفاوت باشند.

شبیه سازی حالت اول:

نتایج محاسبه شاخص های مختلف پیشنهاد شده برای ۵ نوع سیگنال در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، مشاهدات زیر بدست می آید.

۱- سیگنال های اول و دوم دارای زیر هارمونیک و میان هارمونیک نیستند.پس با پنجره ای به طول یک پریود مقادیر دقیق و صحیحی برای THD مرسوم و STHD بدست می آید که با هم نیز برابرند.

۲- چون سیگنال های سوم و چهارم و پنجم دارای زیر هارمونیک و میان هارمونیک هستند، مقادیر بدست آمده برای THD و STHD متفاوت اند و شاخص STHD به واقعیت نزدیک تراست. باید توجه نمود که اگر برای این سه سیگنال طول پنجره برابر یک پریوددر نظر گرفته شود، مقادیر THD و STHD با هم برابر می شوند. واضح است که این نتیجه صحیحی نیست و دلیل آن مناسب نبودن طول پنجره است.

۳- سیگنال های سوم و چهارم شامل هارمونیک های مرتبهٔ صحیح نیستند. بنابراین همانطور که انتظار می رود THD برای این دو سیگنال بسیار کوچک و نزدیک صفر است.

۴- دو سیگنال اول و دوم از نظر مرتبهٔ مولفه های فرکانسی متفاوت اما از نظر دامنهٔ مولفه ها با هم برابر می باشند (دامنه های یکسان در مرتبه های هارمونیکی مختلف). همانطور که انتظار می رود، به جز رابطهٔ THD۴، هیچکدام از روابط نمی توانند بین این دو سیگنال تفاوت قائل شوند. این رابطه که همان روش ضرایب تبدیل موجک وزن داده شده است، بین این دو حالت تفاوت جزئی قائل می شود. دلیل وجود تفاوت آن است که طیف فرکانسی سیگنال اول در سطح جزئیات ششم قرار دارد، اما در سیگنال دوم، هارمونیک ۱۱ام در سطح جزئیات پنجم است .

۵- برای همهٔ سیگنال ها تلفات توان ناشی از مولفه اصلی سیگنال برابر ۰/۵ است. پس برای سیگنال های اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم تلفات ناشی از مولفه های غیر از مولفه اصلی به

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳-No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

ترتیب برابر ۰/۰۳۶۲ و ۰/۰۳۶۴ و ۰/۰۰۶۲ و ۰/۰۲۶۱ و ۰/۰۵۶۸ است، که این مقادیر با تقریب بسیار خوبی برابر با مقادیر حاصل از THD۲ هستند. با توجه به روابط و تعاریف، این انتظار وجود داشت.

۶- برای کلیهٔ شاخص ها به جز شاخص مبتنی بر تبدیل موجک و شاخص THD۳ ، یک رابطهٔ مستقیم بین تلفات ناشی از سیگنال و مقدار شاخص وجود دارد. شکلهای (۱) تا (۶) این ارتباط را نشان می دهند. بنابر این از این دیدگاه، شاخص های THD۳ وTHD۴ شاخص های مناسبی نیستند.

۷- مقادیر مربوط به شاخص THD۳ می تواند مقادیر کمتر از ۱ و یا بزرگتر از ۱ را داشته باشند که از نظر تعبیر فیزیکی، ایجاد اشکال می کند.

شبیه سازی حالت دوم:

در این حالت سیگنال ها دارای طیف فرکانسی ایستا اما فاقد مولفهٔ اصلی هستند. این سیگنال ها با حذف عبارت $\sin(100\pi t)$ از پنج سیگنال اولیه بدست می آیند. در این حالت تنها شاخص های DIN و THD۴ مقادیر محدودی دارند و مقدار سایر شاخص ها بواسطه تقسیم بر صفر بسیار بزرگ می شود.

شبیه سازی حالت سوم:

در این حالت فرض می کنیم که در سیکل اول، سیگنال ها فقط شامل مولفه اصلی هستند. از ابتدای سیکل دوم، سیگنال ها مطابق با تعاریف ابتدای بخش شامل مولفه های غیر از مولفه اصلی بوده و در سیکل آخر (با توجه به طول پنجره)، مجددا" سیگنال ها فقط دارای مولفهٔ اصلی هستند. جدول (۳) شاخص های محاسبه شده برای این سیگنال های غیر ایستا را نشان می دهد. این مقادیر با اعداد جدول (۲) متفاوت هستند. در کلیهٔ شاخص ها به غیر ازشاخص های THD۴ وNRMSE برای بدست آوردن مولفه های سیگنال از تبدیل فوریه استفاده شده است. با توجه به ویژگی های تبدیل فوریه، نتایج مبتنی بر آن می تواند از واقعیت دور باشد. در این حالت تنها نتایج مبتنی بر تبدیل موجک یا تحلیل سیگنال در حوزهٔ زمان، قابل اعتماد اند.

شبیه سازی حالت چهارم:

در این حالت برای مولفه های مختلف پنج سیگنال، فاز غیرصفر در نظر گرفته می شود. درجدول (۴) مقادیر شاخص های محاسبه شده برای این سیگنال ها ارائه شده است. مشاهده می شود که تغییر مشخصهٔ سیگنال بواسطهٔ تغییر فاز برخی از مولفه ها روی برخی از شاخص ها تاثیر می گذارد و روی برخی دیگر که فقط بر اساس اندازهٔ مولفه های مختلف تعریف شده اند، اثری ندارد. بطور مشخص فقط مقادیر شاخص های THD مرسوم و STHD نسبت به مقادیر جدول (۲) تغییر نکرده اند.

۵-۳- جمع بندی نتایج تحلیل و پیشنهاد شاخص مناسب جایگزین مباحث فوق بصورت زیر قابل جمع بندی است.

الف) هدف از معرفی و بکارگیری شاخص ها، بیان وضعیت شبکه با استفاده از روابط بسیار ساده است بطوریکه اولاً با دستگاههای تحلیل گر و مونیتورنیگ معمول قابل محاسبه باشند، ثانیاً براحتی بتوان بر اساس آنها استانداردها را تدوین و برای تحلیل شبکه، مقادیر این شاخص ها را با مقادیر استاندارد مقایسه کرد. با توجه به بررسی های انجام شده، واضح است که این سادگی در بسیاری از حالت ها، تحلیل شرایط شبکه رابا مشکل روبرو می کند وبرای رسیدن به دیدگاهی در رابطه باکیفیت توان لازم است از شاخص های اصلاح شده یا مجموعه ای از شاخص های ساده استفاده کرد. این موضوع یعنی پیچیده شدن شاخص ها یا بکارگیری شاخص های چند گانه با ایدهٔ اصلی معرفی شاخص ها در تناقض است.

ب) البته امروزه با توجه به توسعهٔ سخت افزارها و بکارگیری تحلیل گرهای دیجیتال با توانایی محاسباتی بالا، امکان انجام آلگوریتم های پیچیده و محاسبه شاخص های پیچیده تر و مرکب و یا محاسبهٔ چندین شاخص در یک زمان وجود دارد.

ج) بنابر این با توجه به عدم کارآیی شاخص THD مرسوم در بسیاری از شرایط و با توجه به امکان اجرای آلگوریتم های پیچیده در دستگاههای اندازه گیری و مونیتورینگ فعلی به نظر می رسد معرفی شاخص های دقیق تر و مرکب، یا بکار گیری مجموعه ای از شاخص های ساده ویا تحلیل مستقیم اطلاعات زمانی شکل موج ها ضروری باشد.

د) در صورتی که ضرورت این امر مورد قبول همگان قرار گیرد، لازم است حدود قابل قبول شاخص های جدید با استانداردهای موجود تطبیق داده شود و یا اینکه استانداردهای جدیدی متناسب با شاخص های جدید تدوین گردد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

ه) با توجه به بررسی های صورت گرفته به نظر می رسد فرمول مورد استفاده برایTHD با توجه به کاربرد و وضعیت شبکه تعریف شود. به عنوان مثال وقتی فقط هارمونیک های دائمی در سیگنال موجود هستند استفاده از THD مرسوم مناسب است. یا هنگامی که علاوه بر هارمونیک ها، زیر هارمونیک ها و میان هارمونیک ها هم وجود دارند، از روابط THD اصلاح شده مناسب استفاده شود. در شرایطی هم که محتوی فرکانسی سیگنال متغیر با زمان است، THD برای زمان های مختلف محاسبه و نحوهٔ تغییرات آن با زمان مورد بررسی قرار گیرد. برای تصمیم در مورد اینکه از چه تعریفی برای THD استفاده شود می توان سوابق امر و نوع بار موجود را بررسی کرد و یا اینکه به طور به هنگام نوع اغتشاش موجود آشکار سازی و شناسایی شده و بر این اساس تصمیم گرفته شود که از چه رابطه ای برای محاسبه THD استفاده شود.

و) نتیجه مهم دیگر آن است که در صورت استفاده از دقیق ترین شاخص مرکب برای THD و یا محاسبه مجموعه ای از شاخص ها بصورت بردار، در شرایطی که سیگنال فقط شامل هارمونیک ها است این شاخص مرکب و یا بردار شاخص ها به همان THD مرسوم تبدیل می شوند. امّا در صورتی که سیگنال شامل هارمونیک، میان هارمونیک وزیر هارمونیک یا شامل طیف پیوسته ای از مؤلفه های فرکانسی باشد، این شاخص یا بردار شاخص ها می تواند بطور مناسبی انرژی مؤلفه های غیر از مؤلفهٔ اصلی را نسبت به مؤلفه اصلی بدست دهد. از طرفی اگر سیگنال با زمان متغییر باشد، با حرکت پنجره نمونه ها می توان شاخص را بصورت تابعی از زمان بدست آورد.

ز) همانگونه که از بحث های قبل مشخص است، برای محاسبهٔ محتوی انرژی سیگنال می توان از سه روش پردازش نمونه های زمانی، پردازش اندازهٔ مؤلفه های فرکانسی مختلف استخراج شده توسط تبدیل فوریه یا هر تبدیل دیگر و یا پردازش ضرایب موجک در حوزه زمان ـ فرکانس حاصل از تبدیل موجک استفاده نمود. دقیق ترین مقدار انرژی سیگنال با استفاده از پردازش نمونه های زمانی بدست می آید البته این به طول پنجره استفاده شده و تعداد نمونه ها بستگی دارد. استفاده از تبدیل موجک و پردازش ضرایب موجک در سطوح مختلف تجزیه نیز پاسخ خوبی می دهد به علاوه اینکه می توان انرژی سطوح مختلف و باندهای فرکانسی متناظر را بطور جدا گانه در اختیار داشت.

شاخص پیشنهادی: به عنوان نتیجه گیری نهایی پیشنهاد می شود که یک بردار از کمیت های مناسب شامل انرژی سطوح مختلف تجزیه ناشی از اعمال تبدیل موجک ،rms مؤلفهٔ اصلی سیگنال، مقدار نامی rms مؤلفهٔ اصلی سیگنال و rms برخی از هارمونیک های نزدیک به مؤلفهٔ اصلی سیگنال تشکیل شود. به این ترتیب با ترکیب های مختلف عناصر این بردار می توان نسبت انرژی هر سطح به مؤلفه اصلی و نسبت انرژی هر سطح به مقدار نامی مؤلفه اصلی و نسبت انرژی کل سیگنال بجز مؤلفه اصلی به مؤلفه اصلی و سایر کمیّت هایی که به تحلیل وضعیت سیگنال کمک می کند را بدست آورد. انتخاب ترکیب مناسب به کاربرد خاص مورد نظر بستگی دارد. همچنین می توان در یک کاربرد خاص از چند ترکیب مختلف استفاده و با تحلیل آنها به نتیجهٔ مورد نظر دست یافت.

در صورتی که اندازهٔ مؤلفهٔ اصلی مقدار کوچکی باشد، می توان از مقدار نامی جریان مدار یا ولتاژ باس به عنوان مبنا استفاده نمود. همچنین برای کاربردهای خاص می توان از وزن های مناسب برای مؤلفه ها یا باندهای فرکانسی مشخص استفاده نمود.

تنها در صورتی که سیگنال فقط شامل هارمونیک های صحیح مؤلفه اصلی باشد می توان THD+، THD-، THDresidual را تعریف کرد. اگرعلاوه برهارمونیکهای صحیح، میان هارمونیک ها یا زیر هارمونیک موجود باشند و یا سیگنال شامل طیف پیوسته باشد باید بگونه ای دیگر سیگنال های مدارات سه فاز شامل سه سیگنال های جریان فاز و جریان نوترال و همچنین سه سیگنال ولتاژ فاز به نوترال و ولتاژ نوترال به زمین را بررسی کرد. به نظر می رسد در این حالت بهترین راه این است که بردار شاخص ها برای هر ۸ سیگنال بطور جدا گانه بدست آید و تصمیم گیری برای جریان فاز و ولتاژ فاز با بزرگترین THD صورت گیرد و همچنین بررسی خاص روی THD ولتاژ نوترال به زمین و جریان نوترال انجام شود.

۶- نتیجه گیری

هدف از معرفی و بکار گیری شاخص ها بیان وضعیت شبکه با استفاده از روابط بسیار ساده است. از طرفی در بسیاری از حالت ها، بکار گیری روابط ساده تحلیل شرایط شبکه را با مشکل روبرو می کند. با توجه به عدم کارایی شاخص THD مرسوم در بسیاری از شرایط، به نظر می رسد معرفی شاخص های ترکیبی دقیق تر یا بکارگیری مجموعه ای از شاخص های ساده و یا

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳- No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

تحلیل مستقیم اطلاعات زمانی شکل موج ها ضروری باشد. با توجه به بررسی و مقایسه شاخص های جایگزین معرفی شده برایTHD مرسوم، به منظور حل مشکلات متناظر با بکارگیری این شاخص پیشنهاد می شود، یک بردار شاخص ها شامل انرژی سطوح مختلف تجزیه ناشی از اعمال تبدیل موجک ،rms مؤلفهٔ اصلی سیگنال، مقدار نامی rms مؤلفهٔ اصلی سیگنال و rms برخی از هارمونیک های نزدیک به مؤلفهٔ اصلی سیگنال تشکیل شود. به این ترتیب با ترکیب های مختلف عناصر این بردار می توان نسبت انرژی هر سطح به مؤلفه اصلی و نسبت انرژی هر سطح به مقدار نامی مؤلفه اصلی و نسبت انرژی کل سیگنال بجز مؤلفه اصلی به مؤلفه اصلی و سایر کمیّت هایی که به تحلیل وضعیت سیگنال کمک می کند را بدست آورد. انتخاب ترکیب مناسب به شرایط سیگنال های ولتاژ و جریان و کاربرد مورد نظر بستگی دارد. همچنین می توان در یک کاربرد خاص از چند ترکیب مختلف استفاده و با تحلیل آنها به نتیجهٔ مورد نظر دست یافت.

قدردانی

این مقاله بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی تحت عنوان"بررسی و مقایسه شاخص های کیفیت توان معرفی شده برای شکل موج های ولتاژ و جریان غیر تناوبی" و با کد ۸۱۱ EEA ۱ است که با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام یافته است. مولفین از این معاونت کمال قدردانی را می نمایند.

مراجع

[۱] Thallam, R.S., Heydt, G.T., “Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense.”, IEEE, PES Summer Meeting, July ۲۰۰۰, Seattle, pp.۹۰۵–۹۱۰.

[۲] Heydt, G.T, Jewell, W.T. ,”Pitfalls of Electric Power Quality Indices.”, IEEE, Transactions on power Delivery, Vol.۱۳, No.۲, pp.۵۷۰-۵۷۸, ۱۹۹۸.

[۳] Kandil, M., Elmitwally, A., Farghal, S., ”Refined Power Quality Indices”, *IEE proc. Transm. Distrib.*, Vol.۱٤۸, No.٦, PP.۵۹۰-۵۹٦, ۲۰۰۱

[۴] Lazenby, W. H., Zivanovic, R., “Some Observation on Time Varying Harmonics and Inter Harmonics”, IEEE, AFRICON, Vol.۲, pp ۸۴۹–۸۵۶, ۱۹۹۹.

[۵] Heydt, G.T., “problematic Power Quality Indices.”, IEEE, Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. ۴, Jan. ۲۰۰۰, pp.۲۸۳۸ –۲۸۴۲..

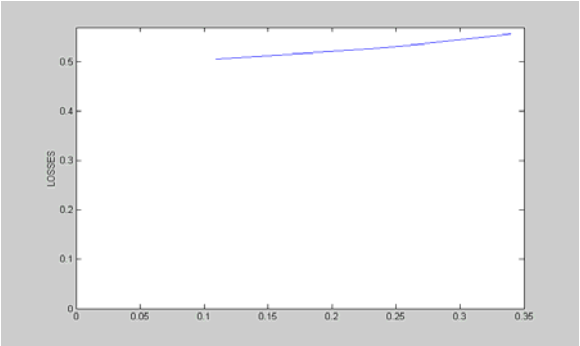
[۶] Jaramillo, S.H., Heydt, G.T., Carrillo,E., ”Power Quality Indices For Aperiodic Voltage and Currents.”, IEEE, Transactions on power Delivery, Vol.۱۵, No.۲, pp.۷۸٤-۷۹۰, ۲۰۰۰.

[۷] Arrillage, J Watson, N. R, Chen, S., Power System Quality Assessment, John Wiley, ۲۰۰۰..

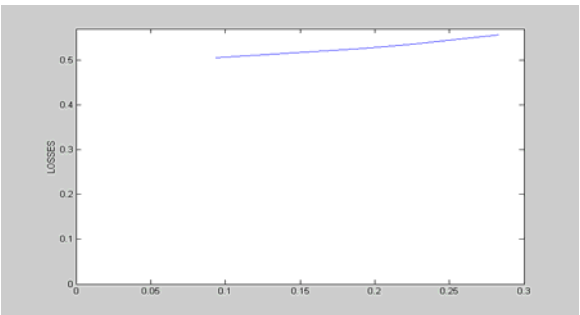
[۸] Wakileh, G. J.,Power Systems Harmonics, Springer,۲۰۰۱.

[۹] Mariscotti, A., “Disscussion on Power Quality Indices for Aperodic Voltage and Currents”, IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. ۱۵, No. ٤, pp. ۱۳۳۳-۱۳۳٤, ۲۰۰۰.

[۱۰] Watson, N.R., Ying, C.K., Arnold, C.P., “A Global Power Quality Index for Aperiodic Waveforms.”, IEEE, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. ۲, July ۲۰۰۰, pp.۹۰۵ –۹۱۰.

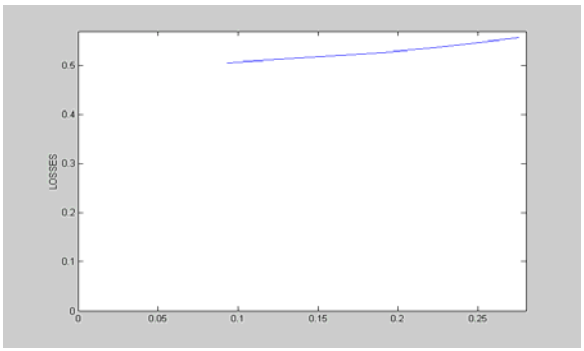


شکل(۱) : رابطه تلفات و مقدار شاخصSTHD

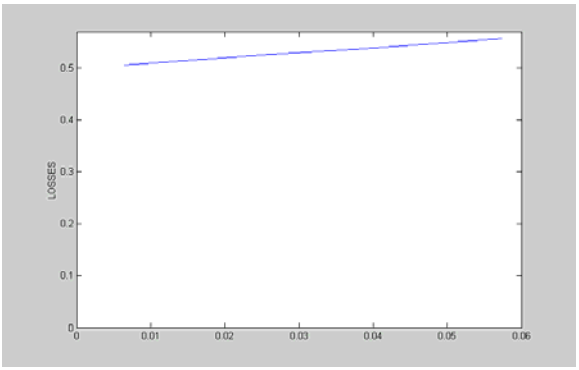


شکل (۲) : رابطه تلفات و مقدار شاخص THD۱

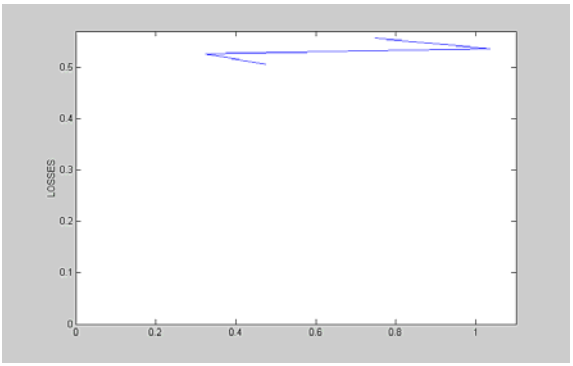
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]



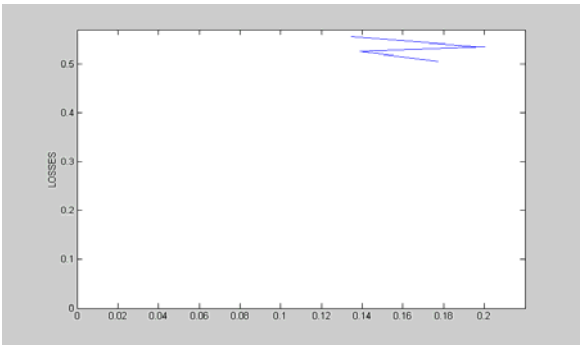
شکل (۳) : رابطه تلفات و مقدار شاخص DIN۱



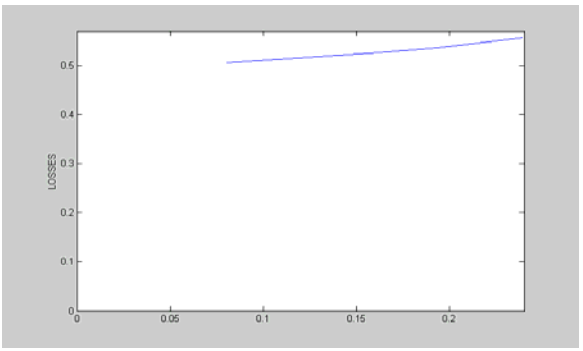
شکل (۴) : رابطه تلفات و مقدار شاخص THD۲



شکل (۵) : رابطه تلفات و مقدار شاخص THD۳



شکل (۶) : رابطه تلفات و مقدار شاخص THD۴



شکل (۷) : رابطه تلفات و مقدار شاخص NRMS

جدول (۱) : رابطه تلفات با مقدار STHD

مرتبهٔ هارمونیکی	دامنهٔ مولفه ها (به ترتیب)	طول پنجره (پرید)	تلفات توان	STHD
۰/۲۵ و ۷ و ۱۰/۲	۰/۲ و ۰/۱ و ۰/۰۵	۵	۰/۵۱۲۲	۰/۲۲۸
۰/۵ و ۳ و ۷/۵	۰/۲ و ۰/۱ و ۰/۰۵	۲	۰/۵۲۵٦	۰/۲۲۹۸
۵ و۹/۲ و ۱۵/۱	۰/۲ و ۰/۱ و ۰/۰۵	۱۰	۰/۵۲٦۱	۰/۲۲۹
۰/۲۵ و ۷ و ۱۰/۲	۰/۵ و ۰/۲ و ۰/۱	۵	۰/٦٤٤٦	۰/۵۵۵۹
۰/۵ و ۳ و ۷/۵	۰/۵ و ۰/۲ و ۰/۱	۲	۰/٦٤۹۲	۰/۵٤۹۲
۵ و۹/۲ و ۱۵/۱	۰/۵ و ۰/۲ و ۰/۱	۱۰	۰/٦٤۹۸	۰/۵٤۷٦
۳ و ۵ و ۹	۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۰۵	۱	۰/۵٦٤۸	۰/۳٦۱٦
۰/۱ و ۰/۵ و ۳/۷	۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۰۵	۱۰	۰/۵٦٦۱	۰/۳٦٤۳
۲ و ۵ و ۷/۹	۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۰۵	۲	۰/۵٦۵۱	۰/۳٦۱٤
۳ و ۵ و ۹	۰/۵ و ۰/۱ و ۰/۰۱	۱	۰/٦۲۸۵	۰/۵۰۷٤
۰/۱ و ۰/۵ و ۳/۷	۰/۵ و ۰/۱ و ۰/۰۱	۱۰	۰/٦۲۹۹	۰/۵۱۰۲
۲ و ۵ و ۷/۹	۰/۵ و ۰/۱ و ۰/۰۱	۲	۰/٦۲۹۹	۰/۵۰۷۸

جدول (۲) : محاسبهٔ شاخص های مختلف برای ۵ نوع سیگنال ایستا

	سیگنال اول	سیگنال دوم	سیگنال سوم	سیگنال چهارم	سیگنال پنجم
طول پنجره(پرید)	۱	۱	۵	۱۰	۲
تلفات توان	۰/۵۳٦۲	۰/۵۳٦٤	۰/۵۰٦۲	۰/۵۲٦۱	۰/۵۵٦۸
THDمرسوم	۰/۲٦۹۷	۰/۲۷۰۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۱۷	۰/۱٤۹۱
STHD	۰/۲٦۹۷	۰/۲۷۰۱	۰/۱۰۹٤	۰/۲۲۸۹	۰/۳٤۰۳
$THD1 = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_1^2}{I_1}}$	۰/۲۲٦۱	۰/۲۲٦۱	۰/۰۹۳٦	۰/۱۹۲۲	۰/۲۸۳٤
$DIN1 = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_1^2}{I_{rms}}}$	۰/۲۲۲۲	۰/۲۲۲۲	۰/۰۹۳۳	۰/۱۸۹۸	۰/۲۷۵۹
$THD2 = \frac{E(i(t) - i_0 Cos(w_o t))}{i_0}$	۰/۰۳۷٤	۰/۰۳۷٤	۰/۰۰٦٤	۰/۰۲٦۲	۰/۰۵۷٤
$THD3 = \frac{V_{Trms}}{V_{1rms}}$	۱/۰۳۵۵	۱/۰۳۵۵	۰/٤۷٤۵	۰/۳۲٤۵	۰/۷٤٦۲
$THD4 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1}\sum_{k=1}^{Nj} 2^{j-1} d_j^2(k)}{\sum_k 2^{m-1} a_m^2(k)}}$	۰/۱۹۵۲	۰/۲۰۰۳	۰/۱۷۷۳	۰/۱۳۹۰	۰/۱۳٤۲
$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_i - V_1)^2}{N}}}{V_1}$	۰/۱۹۳٤	۰/۱۹۳٤	۰/۰۸۰۳	۰/۱٦۲۰	۰/۲۳۹٦

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.۳- No.۲- Fall and winter ۲۰۰۶
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]

جدول (۳) : محاسبهٔ شاخص های مختلف برای ۵ نوع سیگنال غیرایستا

	سیگنال دوم	سیگنال چهارم	سیگنال پنجم
طول پنجره(پرید)	۳	۱۲	٤
تلفات توان	۰/۵۱۲۱	۰/۵۲۱۸	۰/۵۲۸٤
THDمرسوم	۰/۰۹۰۱	۰/۰۰۱٤	۰/۰۷٤۵
STHD	۰/۱۵۷۵	۰/۲۰۹٤	۰/۳۳۹۱
$THD1=\sqrt{\frac{I_{rms}^2-I_1^2}{I_1}}$	۰/۱۳۰۷	۰/۱۷۵٤	۰/۲۰۰۵
$DIN1=\sqrt{\frac{I_{rms}^2-I_1^2}{I_{rms}}}$	۰/۱۲۹۹	۰/۱۷۲٦	۰/۱۹۷۷
$THD2=\frac{E(i(t)-i_0Cos(w_ot))}{i_0}$	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۱۹	۰/۰۲۸۷
$THD3=\frac{V_{Trms}}{V_{1rms}}$	۰/۵۷۷۱	۰/۲۸۸٦	۰/٤۹۹۸
$THD4=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1}\sum_{K=1}^{Nj}2^{j-1}d_j^2(k)}{\sum_K 2^{m-1}a_m^2(k)}}$	۰/۱٦۸۷	۰/۲٤۵۷	۰/۱۹۲٤
$NRMSE=\frac{\sqrt{\frac{\sum(V_s-V_i)^2}{N}}}{V_1}$	۰/۱۱۱۸	۰/۱٤۷۹	۰/۱٦۹۵

جدول (۴) : محاسبهٔ شاخص های مختلف برای ۵ نوع سیگنال ایستا که دارای مولفه های با فازهای مختلف هستند.

	سیگنال اول	سیگنال دوم	سیگنال سوم	سیگنال چهارم	سیگنال پنجم
طول پنجره	۱	۱	۵	۱۰	۲
تلفات توان(پرید)	۰/۵۳٦۹	۰/۵۳٦٤	۰/۵۰٦٦	۰/۵۲٦۱	۰/۵۵٦۹
THD مرسوم	۰/۲۷۰۲	۰/۲۷۰۵	۰/۰۰٦۵	۰/۰۰۱۸	۰/۱٤۹۳
STHD	۰/۲۷۰۲	۰/۲۷۰۵	۰/۱۱۲۰	۰/۲۲۸۹	۰/۳٤۰٦
$THD1=\sqrt{\frac{I_{rms}^2-I_1^2}{I_1}}$	۰/۲۲۸۹	۰/۲۲۷٦	۰/۱۳۹۵	۰/۱۹۲۳	۰/۲۸٤۱
$DIN1=\sqrt{\frac{I_{rms}^2-I_1^2}{I_{rms}}}$	۰/۲۲٤۹	۰/۲۲۳٦	۰/۱۳۸۵	۰/۱۸۹۹	۰/۲۷٦۵
$THD2=\frac{E(i(t)-i_0Cos(w_ot))}{i_0}$	۰/۰۳۷۵	۰/۰۳۷۵	۰/۰۰٦۸	۰/۰۲٦۲	۰/۰۵۷۵
$THD3=\frac{V_{Trms}}{V_{1rms}}$	۱/۰۳۵۵	۱/۰۳۵۵	۰/٤۸۸۹	۰/۳۲۷۱	۰/۷۸۲۸
$THD4=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1}\sum_{K=1}^{Nj}2^{j-1}d_j^2(k)}{\sum_K 2^{m-1}a_m^2(k)}}$	۰/۰۸۹۵	۰/۰۹۲۰	۰/۱۱۷۸	۰/۱۲۵۰	۰/۰۹۵۵
$NRMSE=\frac{\sqrt{\frac{\sum(V_s-V_i)^2}{N}}}{V_1}$	۰/۲٦۷۸	۰/۲٦۸۱	۰/۱۸۷۸	۰/۲٤۵۷	۰/۳۰۲۹

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-06-10]