

تعیین میزان آلودگی هارمونیک انواع بارهای غیرخطی در شبکه توزیع برق هرمزگان با بکارگیری شاخص جدید کیفیت توان و مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

12-F-PQA-1005

امید امانی فر^۱، حسین برهانی بهابادی^۱، محمد کیوانفرد^۱، عقیل داوری^۱، محمدصادق وجدانی^۱ و غلامرضا نعمتی

^۱ شرکت مشاوره و تحقیقات صنعتی پژوهنده نیرو اصفهان - پارک علمی تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان

info@pajoohandeh-niroy.com

^۲ شرکت توزیع نیروی برق هرمزگان، vojhdani@hedc.co.ir

^۳ دانشگاه جامع علمی کاربردی بافق

واژه های کلیدی - شبکه‌های توزیع، رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک، شاخص کیفیت توان،

مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

می‌شود. بر این اساس رتبه‌بندی هارمونیک انواع بارهای موجود در شبکه با توجه به شاخص‌های کیفیت توان، بر اساس منابع تولیدکننده اعوجاج به طور مستقیم از هر بار هارمونیک قابل محاسبه خواهد بود.

۱ - مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی به عنوان یک انرژی پر مصرف و با رشد چشم‌گیر در جهان، به عنوان یک کالای با ارزش، بیشترین مصرف‌کننده را در تمامی ساعات شبانه روز داراست. بدین منظور این انرژی برای استفاده مطلوب، باید دارای ویژگی‌های کیفیتی خاصی باشد. گسترش دستگاه‌های حساس به کیفیت برق و افزایش بارهای غیرخطی و تجهیزات الکتریکی آلوده‌کننده، از مهمترین دلایلی است که در طی یک دهه گذشته بر روی مفهوم کیفیت توان تمرکز زیادی صورت گرفته است. لذا جهت تعیین سطح و میزان کیفیت توان، پارامترهای مشخصی از کیفیت توان در شبکه اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از

چکیده

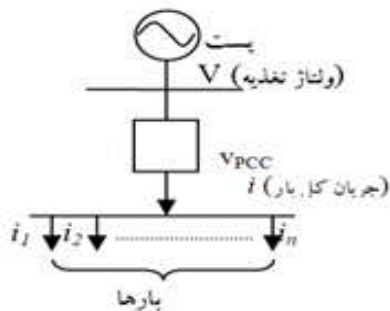
در این مقاله تعیین میزان آلودگی هارمونیک انواع بارهای غیرخطی مانند تجاری، اداری، مسکونی و متفرقه شامل بارهای بیمارستانها، هتل‌ها، اداره‌ها و دانشگاه‌ها در شبکه توزیع برق هرمزگان انجام می‌گیرد. به این منظور از شاخص کیفیت توان جدیدی که به طور مستقیم در ارتباط با تولید منابع هارمونیک در شبکه با توجه به بارهای غیر خطی می‌باشد و بکارگیری مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته، استفاده میشود. این شاخص جهت تعیین میزان و رتبه‌بندی آلودگی‌های هارمونیک ناشی از انواع بارها به کار برده می‌شود. میزان ترکیب بارهای الکتریکی و کل اعوجاج هارمونیک برای جریان‌های تخمین زده شده در هر بار هارمونیک، در تعریف این شاخص به کار گرفته خواهد شد. مدل چندجمله‌ای چندمتغیره برای مشخص نمودن شاخص‌های کیفیت توان استفاده می‌شود. سپس، رتبه‌بندی منابع تولیدکننده اعوجاج برای هر بار غیرخطی که تأثیرات نامطلوبی را بر کل سیستم می‌گذارد، مشخص

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

تقلیل یافته می‌پردازد [۶-۸]. این مدل‌ها به منظور تخمین میزان ترکیب بارهای الکتریکی و هارمونیکهای آنها با توجه به مراجع [۹-۱۰] بیان شده‌اند. در بخش چهارم، روش کلی به کارگیری شاخص کیفیت توان اعوجاجی با توجه به اعوجاج ولتاژ در نقطه اتصال مصرف‌کنندگان به شبکه، PCC، توضیح داده خواهد شد. شبیه‌سازی در بخش پنجم و در بخش ششم نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- معرفی شاخص کیفیت توان اعوجاجی

شکل (۱)، شبکه توزیع قدرت نمونه‌ای را نشان می‌دهد. زمانی که بارهای غیرخطی از یک منبع ولتاژ سینوسی تغذیه می‌شوند، جریان‌های هارمونیک را به شبکه تزریق می‌کنند.



شکل (۱) دیاگرام تک‌خطی یک شبکه توزیع نمونه

جریان‌های هارمونیک می‌توانند باعث افت ولتاژ هارمونیک در شبکه شوند و بنابراین باعث اعوجاج ولتاژ در نقطه اتصال مصرف‌کنندگان به شبکه گردند [۹]. در این شرایط تولید توان اعوجاجی از هر باری به طور عمده به دو فاکتور زیر وابسته است:

۱- چه مقدار جریان از محل اتصال بار هارمونیک به شبکه طبق شکل (۱)، به هر بار غیر خطی تزریق می‌شود؟

۲- به چه میزانی شکل موج‌ها با توجه به مولفه‌های هارمونیک فرکانس بالا، دچار اعوجاج می‌شوند؟

دو سوال مطرح شده را می‌توان به ترتیب با محاسبه میزان ترکیب انواع بارهای موجود و THD جریان‌های بارها بدست آورد. از طرفی شاخص کیفیت توان اعوجاجی مرتبط با توان اعوجاجی بار مشخص n بوده و از طریق میزان ترکیب انواع بار و THD طبق رابطه (۱) محاسبه

آن، تحلیل و با استانداردهای موجود مقایسه و از آنها به عنوان اساس فعالیت‌های جبران و بهبود استفاده می‌شود. در این میان تولید هارمونیک و وجود آلودگی‌های هارمونیک از جمله مشکلات مهم پیش روی تجهیزات و شبکه‌ها هستند. افزایش بارهای غیرخطی می‌تواند باعث ایجاد اعوجاج در ولتاژ شبکه شده و در نتیجه شبکه توزیع قدرت اعوجاجی در شرایط نامطلوب از دیدگاه کیفیت توان قرار می‌گیرد. از جمله این مشکلات می‌توان به کاهش راندمان کلی، قطع برق ناشی از اعوجاج‌های شدید هارمونیک و خرابی تجهیزات حساس اشاره نمود. برای رفع مشکلات موجود، محدودیت‌های لازم بر میزان جریان‌های هارمونیک و ولتاژ شبکه، در استانداردهایی نظیر IEEE519 آورده شده‌اند [۱-۳]. از جمله مهمترین این محدودیت‌ها می‌توان به اعوجاج هارمونیک کل، THD، اشاره نمود. THD مشخص می‌کند که به چه میزان شکل موج بواسطه مولفه‌های هارمونیک فرکانس بالا، دچار اعوجاج شده‌است. اما تمرکز تنها بر میزان THD جهت بررسی اثرات بارهای آلوده‌کننده شبکه بر کل توان سیستم، امری لازم ولی ناکافی می‌باشد. بنابراین لزوم تعریف شاخص‌های کیفیت توان دیگر برای حل مشکلات هارمونیک ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر آن چندین شاخص کیفیت توان نظیر SAIFI, SARFI, SAIDI, CAIDI در مراجع [۴-۵] در رابطه با آنالیز شکل موجهای ولتاژ و جریان آورده شده‌اند. اما آنچه در این مقاله مد نظر می‌باشد، تمرکز بر روی شاخصی از کیفیت توان است که بر رابطه مستقیم بین مشکلات هارمونیک و منابع اعوجاجی دلالت دارد. این شاخص کیفیت توان برای بررسی اثرات هر بار غیرخطی در نقطه اتصال به شبکه بوده و بر اساس مفهوم توان اعوجاجی تولید شده از هر بار معرفی شده و میزان آلودگی هارمونیک انواع بارها در شبکه را مشخص می‌نماید. در این مقاله در بخش دوم، شاخص کیفیت توان اعوجاجی برای تعیین رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک نسبی برای بارهای غیرخطی بیان می‌شود. بخش سوم به معرفی مدل چندجمله‌ای چندمتغیره

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$g(\alpha, x) = \alpha^T p(x) \quad (4)$$

این جایگزینی با استفاده از بردار پارامتری α و تابع $p(x)$ که متشکل از متغیرهای بردار رگرسیون می‌باشد، انجام می‌شود. با معلوم بودن نقاط m به گونه‌ای که $K < m$ باشد و با استفاده از روش خطای حداقل مربعات در رابطه (۵)، بردار پارامتری α طبق رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$s(\alpha, x) = \sum_{i=1}^m [y_i - g(\alpha, x_i)]^2 = [y - P\alpha]^T [y - P\alpha] \\ \alpha = (P^T P)^{-1} P^T y \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $P \in R^{m \times K}$ بر ماتریس ژاکوبین $p(x)$ دلالت داشته و ماتریس y برابر $[y_1, \dots, y_m]^T$ می‌باشد. یک روش ساده برای اصلاح ثبات عددی، انجام یک رگولاسیون کاهش وزنی با استفاده از دنبال نمودن خطای هدف طبق رابطه (۷) می‌باشد.

$$s(\alpha, x) = \sum_{i=1}^m [y_i - g(\alpha, x_i)]^2 + b \|\alpha\|_2^2 = \\ [y - P\alpha]^T [y - P\alpha] + b \alpha^T \alpha \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $\|\cdot\|_2$ اشاره بر نرم l_2 و b ثابت رگولاسیون است. با حداقل‌سازی تابع هدف (۷)، رابطه (۸) نتیجه می‌شود.

$$\alpha = (P^T P + bI)^{-1} P^T y \quad (8)$$

$P \in R^{m \times K}$ ، $Y \in R^{m \times 1}$ و I ماتریس واحد $K \times K$ است.

۳-۲- مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

روش رگرسیون چندجمله‌ای چندمتغیره، برای بیان روابط ورودی - خروجی غیرخطی بوده، اما برای مدل مرتبه n_{th} با ابعاد ورودی L ، تعداد پارامترهای قابل تنظیم مستقل، با نرخ رشد L^T ، رشد می‌کنند. بنابراین این مدل نیاز به مقادیر زیادی از داده‌های آموزش دیده شده جهت تعیین صحیح پارامترها دارد. به منظور کاهش تعداد زیاد ترم‌ها، مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته در رابطه (۹) بررسی می‌شود [۱۳-۱۴].

$$\hat{f}_{MN}(\alpha, x) = \alpha_0 + \sum_{j=1}^J (\alpha_{j1} x_1 + \alpha_{j2} x_2 + \dots + \alpha_{jn} x_n) \quad (9)$$

رابطه (۹) یک مدل تخمین غیرخطی برای حالتی است که پارامترهای وزنی α_{ji} امکان تخمین زدنشان با روش‌های مستقیم نمی‌باشد. علی‌رغم آنکه یک روش جستجوی

می‌شود. شکل موج جریان هر بار در رابطه (۲) مشخص شده‌است.

$$DPQI(n) = \text{THD}(i_n) \times \text{میزان ترکیب بار} \quad (1)$$

$$i_n(t)_T = i_{n,1}(t)_T + \sum_{h=2}^{\infty} i_{n,h}(t)_T \quad (2)$$

در رابطه (۲)، T دوره تناوب جریان اندازه‌گیری شده i و h تعداد مولفه‌های هارمونیک فرکانس بالا است. برای همه بارهای متصل به شبکه طبق شکل (۱)، شاخص کیفیت توان اعوجاجی، اطلاعات مهمی را از نحوه و میزان تأثیر هر بار بر شبکه در نقطه اتصال و با توجه به رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک ناشی از تولید توان هارمونیک در اختیار قرار میدهد. در این مطالعه، از مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته برای تخمین میزان ترکیبات بارهای هارمونیک و هارمونیکهای بار غیرخطی و محاسبه THD هر جریان بار استفاده می‌شود. مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته، نوعی تکنیک بهینه‌سازی برای سنجش وزن پارامترهای موثر در یک پدیده بر اساس نگاشت ورودی - خروجی غیرخطی می‌باشد. مزیت عمده این مدل نسبت به مدل‌های دیگر مانند شبکه‌های عصبی، ویژگی یکبار آموزش می‌باشد [۱۱-۱۲]. به عبارت دیگر، این مدل نیازمند روش‌های تکراری برای رسیدن به یک بردار وزنی راه حل نمی‌باشد.

۳-۳- مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

۳-۱- مدل چندجمله‌ای چندمتغیره

مدل چندجمله‌ای چندمتغیره را می‌توان طبق رابطه (۳) بیان نمود [۱۳-۱۴].

$$g(\alpha, x) = \sum_{i=1}^K \alpha_i x_1^{n_1} x_2^{n_2} \dots x_n^{n_n} \quad (3)$$

رابطه (۳) برای همه متغیرهای مثبت n_1 تا n_L به گونه‌ای که مجموع n_1 تا n_L کمتر از r باشد، بیان می‌شود. r همان مرتبه تقریب است. بردار $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K]$ ، یک بردار پارامتری می‌باشد که باید تخمین زده شود و x بردار $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ شامل ورودی‌ها است. کل تعداد ترم‌ها در $g(\alpha, x)$ برابر K است. مدل چندجمله‌ای چندمتغیره رابطه (۳) را میتوان با رابطه (۴) جایگزین نمود.

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

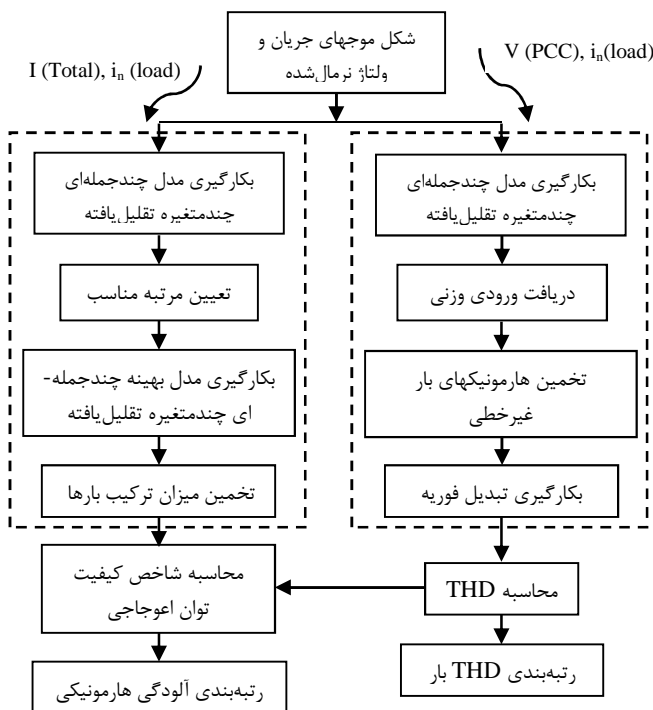
واقعی و تخمینی RMSE و درصد قدر مطلق خطای میانگین MAPE در رابطه (۱۳) که y_m و \hat{y}_m بترتیب مقادیر واقعی و تخمین‌زده شده و n تعداد نمونه‌های اطلاعات هستند، با اندازه‌گیری شکل موجهای جریان واقعی محاسبه میشوند [۱۳-۱۴].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=0}^{n-1} (y_m - \hat{y}_m)^2},$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{n-1} \left| \frac{y_m - \hat{y}_m}{y_m} \right| \quad (13)$$

۴- روش کلی محاسبه شاخص کیفیت توان اعوجاجی با استفاده از مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

محاسبه میزان ترکیب بار و THD جریان‌های بار هارمونیک برای بکارگیری در شاخص کیفیت توان اعوجاجی طبق رابطه (۱) ضروری است. مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته برای تخمین دو فاکتور قبلی در نظر گرفته می‌شوند. روش کلی برای محاسبه شاخص کیفیت توان اعوجاجی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) روش کلی برای محاسبه شاخص کیفیت توان اعوجاجی [۱۳]

تکرارشونده میتواند برای حل این مساله به کار گرفته شود، هیچ تضمینی نمی‌باشد که این راه‌حل‌ها کلی باشند. برای فائق آمدن بر این مشکل، یک مدل خطی شده بررسی می‌شود [۷]. با فرض آنکه که α نقطه α_1 در تابع چند جمله‌ای، متمایز باشند، با استفاده از تئوری مقدار میانگین، تابع چند جمله‌ای $f(\alpha) = (\alpha_{j1}x_{j1} + \alpha_{j2}x_{j2} + \dots + \alpha_{jl}x_{jl})^l$ حول نقطه α_1 را می‌توان طبق رابطه (۱۰) بیان نمود.

$$f(\alpha) = f(\alpha_1) + (\alpha - \alpha_1)^T \nabla f(\bar{\alpha}) \quad (10)$$

در این رابطه $0 \leq \beta \leq 1$ و $\bar{\alpha} = (1 - \beta)\alpha_1 + \beta\alpha$ میباشد. با حذف نمودن نقطه مرجع α_1 و ضرایب داخل تابع $f(\alpha_1)$ و $\nabla f(\bar{\alpha})$ و قرار دادن مجموع وزنی ترم‌های ورودی وزن‌دار شده، مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته پیشنهادی را می‌توان طبق رابطه (۱۱) بدست آورد.

$$\hat{f}_{MNP}(\alpha, x) = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_{j1}x_{j1} + \sum_{j=1}^r \alpha_{1+j}(x_1 + x_2 + \dots + x_l)^j + \sum_{j=2}^r (\alpha_j^T \cdot x)(x_1 + x_2 + \dots + x_l)^{j-1}, l \geq 2 \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) تعداد ترم‌ها طبق رابطه $k = 1 + r(l + 1)$ مشخص می‌شوند. برای وارد نمودن ترم‌های مرتبه بالاتر برای رابطه (۱۱)، مدل را می‌توان طبق رابطه (۱۲) نوشت.

$$\hat{f}_{MNP}(\alpha, x) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^l \alpha_{kj}x_{kj}^k + \sum_{j=1}^r \alpha_{r1+j}(x_1 + x_2 + \dots + x_l)^j + \sum_{j=2}^r (\alpha_j^T \cdot x)(x_1 + x_2 + \dots + x_l)^{j-1}$$

تعداد ترم‌ها را می‌توان به صورت رابطه $k = 1 + r + l(2r - 1)$ بیان کرد. رابطه (۱۲) دارای $(2r - 1)$ ترم بیشتر از رابطه (۱۱) است. مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته که در آن تعداد پارامترهای وزنی به طور خطی افزایش می‌یابند، الگوریتم بهتری را در سیستم‌های چند جمله‌ای مرتبه بالا در مقایسه با مدل‌های چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل نیافته بدست می‌دهند.

۳-۳- ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی

برای ارزیابی عملکرد مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته در مساله تخمین، انحراف مطلق بین مقادیر

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

دستیابی به دقت تخمین مناسب قابل کاربرد می‌باشد. بعد از انجام چندین تست مدل مرتبه ۶ برای تخمین میزان ترکیب بار به کار گرفته شد [۷]. از طرفی توانهای اکتیو P ، راکتیو Q_B ، ظاهری S_a و توان اعوجاج D برای هر بار با روابط (۱۶) قابل محاسبه است.

$$\begin{cases} P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} v(m) \cdot i_n(m) \\ S_{a,n} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} v(m) \cdot v(m)} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_n(m) \cdot i_n(m)} \\ Q_{B,n} = S_{a,n} \cdot \sin((\theta - \varphi)_{\text{fundamental}}) \\ D_n = \sqrt{S_n^2 - P_n^2 - Q_{B,n}^2} \end{cases}$$

(۱۶)

در این روابط N ، تعداد نمونه‌های بدست آمده در یک دوره تناوب و n نیز بر نوع بار دلالت دارد که مطابق با میزان ترکیب بار برای جریان کل $i(t)$ در PCC می‌باشد.

۲-۴- تخمین هارمونیکهای بار غیرخطی و THD با مدل

چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

جریان‌های هارمونیک بارهای غیرخطی ممکن است دارای ولتاژ اعوجاجی V_{PCC} طبق شکل (۱) باشند. بنابراین ارتباط غیرخطی بین V_{PCC} اعوجاجی و هارمونیک‌های جریان بار ایجاد می‌شود. تخمین میزان ترکیب بار در رابطه (۱) می‌تواند بدون در نظر گرفتن ولتاژ اعوجاجی یا سینوسی کامل برای بارهای مختلف انجام شود، زیرا که تخمین میزان ترکیب بار تنها با قسمتی از هر جریان بار در PCC مرتبط است. اما زمانیکه THD محاسبه شود، توجه به هارمونیک‌های بار غیرخطی در حضور V_{PCC} اعوجاجی ضروری است. این مشکل حتی در زمانی که یک بار منفرد به PCC متصل شود، وجود دارد. اگر تزریق جریان هارمونیک از بار، به درستی شناخته شود، شبکه می‌تواند از تعرفه‌های مشخصی برای آن استفاده نماید. با یکبار آموزش مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل- یافته بر اساس الگوریتم ارائه شده در شکل (۳)، هارمونیکهای بار غیرخطی به طور دقیق قابل تخمین هستند.

بخش سمت چپ شکل (۲) نشاندهنده نحوه تخمین میزان ترکیب بارها و به کارگیری مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته و بخش سمت راست نشاندهنده نحوه محاسبه THD برای هارمونیک‌های بار غیرخطی در زمانی است که ولتاژ در محل اتصال مصرف‌کننده به شبکه سینوسی خالص نباشد. شاخص کیفیت توان اعوجاجی پیشنهادی در رابطه (۱)، اعوجاج جریان را بدون بررسی آن در ولتاژ، بدست می‌دهد. برای به حساب آوردن حالتی که در آن ولتاژ دچار اعوجاج باشد، هارمونیکهای بار غیرخطی بوسیله مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته مشابه، برای محاسبه THD مناسب پیش‌بینی میشوند.

۱-۴- تخمین ترکیب بار با استفاده از

مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته

برای فرمولاسیون ترکیب بار، کل جریان الکتریکی

$i(t)$ در شکل (۱)، توسط رابطه (۱۴) مدل می‌شود.

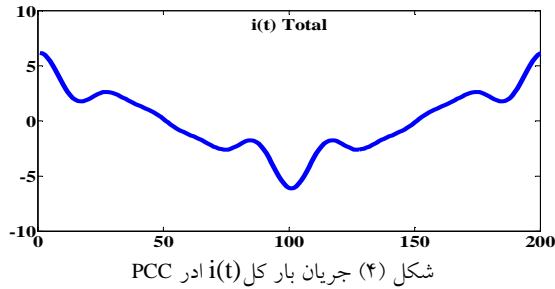
$$i(t) = k_1 i_1(t) + k_2 i_2(t) + \dots + k_{n-1} i_{n-1}(t) + k_n i_n(t) \quad (14)$$

K_1, K_2, \dots, K_{n-1} ضرایب مجهول هستند. این ضرایب برای تعیین میزان ترکیب جریان بار با توجه به کل جریان می‌باشند. نحوه بکارگیری مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته بدین صورت است که، با توجه به مرتبه اول بودن تابع رابطه (۱۴)، این مدل با مرتبه اول $r=1$ در رابطه (۱۲)، بسادگی به کار برده شده و معادله مرتبط با آن در رابطه (۱۵) داده شده است. با مقایسه رابطه بین بردار ضرایب $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^t$ و بردار میزان ترکیبات بار $k = [k_1, k_2, \dots, k_n]^t$ مجهول‌های مساله یعنی k_1, k_2, \dots, k_n در رابطه (۱۵)، بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \hat{f}_{MNP-1}(\alpha, x) &= \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{kj} x_j^k + \\ \sum_{j=1}^r \alpha_{n+j} (x_1 + x_2 + \dots + x_1)^j &= \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \\ \alpha_n (x_1 + x_2 + \dots + x_n) &= \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_n) x_1 + \\ (\alpha_2 + \alpha_n) x_2 + \dots + (\alpha_n + \alpha_n) x_n &= k_1 i_1 + k_2 i_2 + \\ \dots + k_n i_n & \quad (15) \end{aligned}$$

در حالت عملی در حضور نویز و یا ارتباط بین بارهای هارمونیک غیرخطی، مدل پیشنهادی مرتبه بالا برای

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق



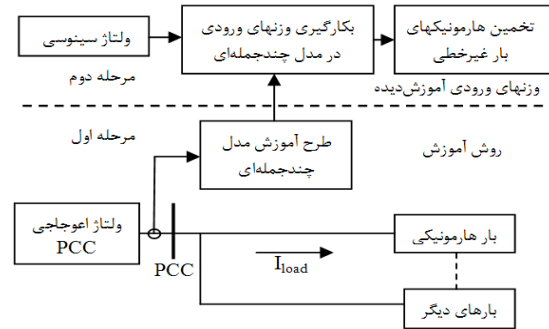
شکل موج جریان اندازه‌گیری شده در شکل (۴) نشان داده شده است. فرکانس نامی 50Hz و ولتاژ نامی خط ورودی 20 کیلوولت و دارای THD معادل $18/07\%$ و شامل هارمونیکهای غالب سوم، پنجم، هفتم و نهم می‌باشد. نمونه‌های زمانی محور افقی در این شکل $0/0001$ ثانیه می‌باشد. 4 دسته بار غالب تجاری، اداری، مسکونی و متفرقه متصل به PCC به ترتیب با حروف T, A, Ms و Mo نشان داده شده‌اند. جریان نرمالیزه شده هر یک از بارها بر حسب مولفه‌های هارمونیک در جدول (۱) ارائه شده است. دامنه مولفه اصلی و هارمونیک جریان بر حسب پریونیت بیان شده‌اند.

جدول (۱) شکل موج جریان بارهای نمونه در شبکه

نوع بار	شکل موج جریان
تجاری	$i_T(t) = 1.0 \cos(\omega t) + 0.08 \cos(3\omega t) + 0.24 \cos(5\omega t) + 0.54 \cos(7\omega t) + 0.07 \cos(9\omega t)$
اداری	$i_A(t) = 1.0 \cos(\omega t) + 0.075 \cos(3\omega t) + 0.15 \cos(5\omega t) + 0.0744 \cos(7\omega t) + 0.033 \cos(9\omega t)$
مسکونی	$i_{Ms}(t) = 1.0 \cos(\omega t) + 0.039 \cos(3\omega t) + 0.4799 \cos(5\omega t) + 0.2996 \cos(7\omega t) + 0.019 \cos(9\omega t)$
متفرقه	$i_{Mo}(t) = 1.0 \cos(\omega t) + 0.095 \cos(3\omega t) + 0.34 \cos(5\omega t) + 0.24 \cos(7\omega t) + 0.06 \cos(9\omega t)$

۵-۲- اجرای تخمین میزان ترکیب بارها

بردار پاسخ حاصل از بکارگیری مدل چندجمله‌ای چند متغیره تقلیل یافته در رابطه (۱۴) به صورت زیر است،
 $L = [k_1, k_2, k_3, k_4]^t$ میزان ترکیب بار $[i_T, i_A, i_{Ms}, i_{Mo}]$
 $= [0.085, 0.756, 0.461, 0.161]$
 بدست می‌آید. توجه شود که این تخمین در یک سیکل انجام شده است. شکل (۵)، جریان بارهای تخمین زده شده است.



شکل (۳) روش تخمین هارمونیکهای بار غیرخطی [۱۳]

در هر زمانی که آموزش همگرا شد، وزنهای ورودی آموزش دیده به مرحله دوم منتقل شده که در آن مدل بوسیله یک ولتاژ سینوسی برای تخمین خروجیها تغذیه میشوند. خروجی مدل در مرحله دوم، جریانهایی هستند که بارهای غیرخطی به PCC تزریق کرده‌اند. بعد از تخمین هارمونیکهای بار غیرخطی با استفاده از مدل چندجمله‌ای، تبدیل فوریه سریع گسسته برای پیش‌بینی جریانهای هارمونیک در هر بار به کار برده می‌شود. THD بوسیله رابطه (۱۷) محاسبه میشود.

$$THD(i_n) = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2 / i_1} \right) \times 100[\%] \quad (17)$$

۵- نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- اطلاعات سیستم

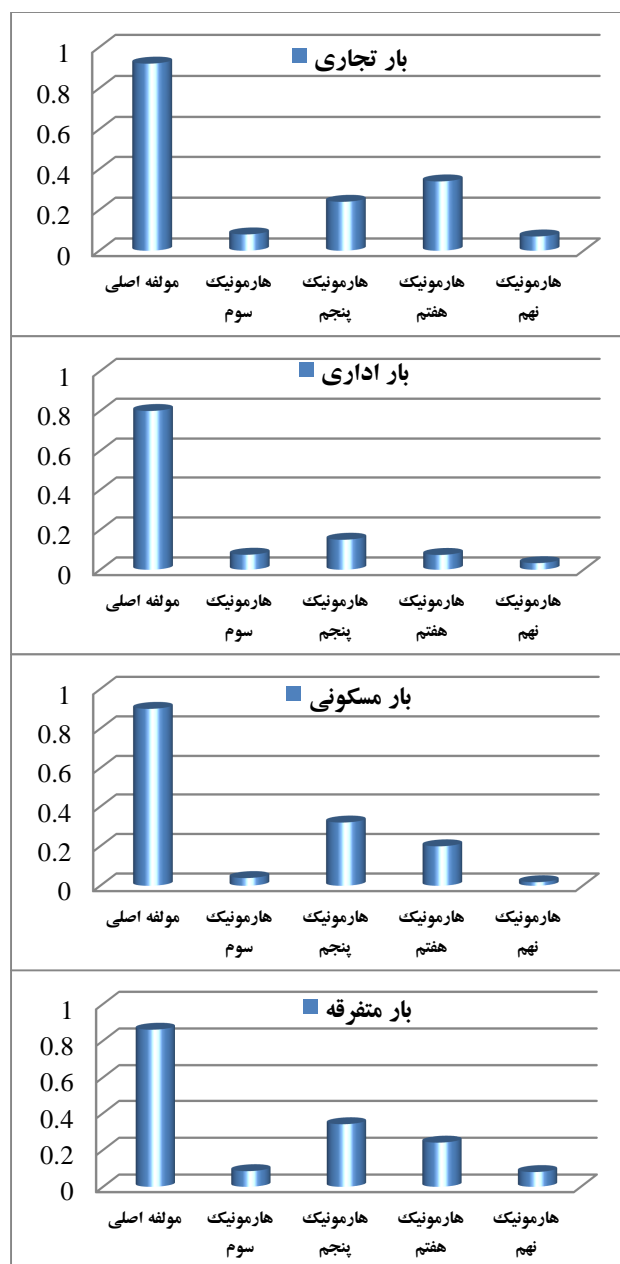
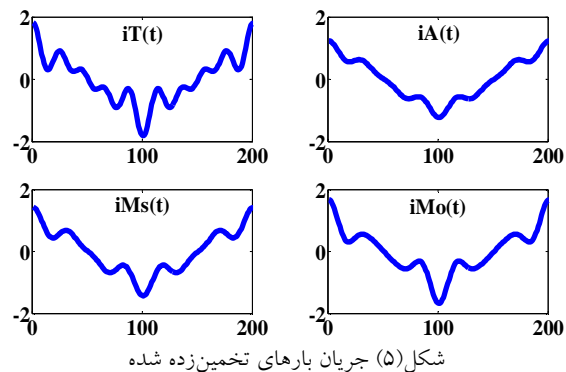
به منظور بررسی وضعیت هارمونیک شبکه توزیع هرمزگان، انجام شبیه‌سازی با انتخاب یکی از امور برق شبکه توزیع هرمزگان و دسته‌بندی کلیه بارهای آن امور به 4 دسته کلی تجاری، اداری، مسکونی و متفرقه (شامل بیمارستان، هتل، دانشگاه، ترمینال و ...) انجام شده است. همانند مدل ارائه شده در شکل (۱)، کل این بارها از دید پست فوق توزیع (شینه 20 کیلوولت) دیده می‌شوند. لذا با فرض آنکه جریان کل $i(t)$ در نقطه PCC در یک دوره زمانی T اندازه‌گیری شده باشد، با استفاده از تبدیل فوریه، مولفه جریان کل از سمت پست فوق توزیع بصورت رابطه (۱۸) بدست می‌آید:

$$i(t) = 815.5 \cos(\omega t) + 10.29 \cos(2\omega t) + 82.25 \cos(3\omega t) + 116.5 \cos(5\omega t) + 32.45 \cos(7\omega t) + 12.45 \cos(9\omega t) + 8.21 \cos(11\omega t) \quad (18)$$

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

مقادیر RMSE و MAPE برای ارزیابی عملکرد مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل‌یافته بترتیب برابر ۰/۰۰۸۸ و ۰/۰۵۵۶٪ بدست می‌آید. همانطور که در بخش ۴-۲ شرح داده شد، مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل‌یافته با مرتبه ۶، برای تخمین وزن ورودی‌ها در مرحله اول (THD برابر ۱۸/۰۷٪) آموزش داده می‌شود. بار هارمونیک توسط همان مدل چندمتغیره تقلیل‌یافته در مرحله دوم با بکارگیری ولتاژ سینوسی خالص تخمین زده می‌شوند. نتایج تخمین جریانها دارای دقت بسیار بالایی هستند. مولفه‌های هارمونیک متناظر با جریانهای تخمین‌زده شده در شکل (۶) آمده‌است.

بردار توان اعوجاجی برای هر بار بوسیله رابطه (۴) با تخمین میزان بار ترکیبی بصورت $L = [D_T, D_A, D_{Ms}, D_{Mo}]^t = [0.89, 1.23, 1.43, 2.45]$ و بر حسب مگاوات آمپر اعوجاجی بوده و در شکل (۷) نشان داده شده‌است. با توجه به شکل (۷)، مشخص است که بارهای متفرقه مانند بیمارستانها و کارخانجات سیمان، بیشتر بودن مقدار D آن دارای اثر مخربی بواسطه افزایش مشکلات کیفیت توان است.



شکل (۷) توانهای اکتیو، ظاهری و اعوجاجی هر بار

شکل (۶) مولفه‌های هارمونیک تخمین‌زده شده هر جریان بار

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

داشته‌است. رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک نیز بر اساس نسبت شاخص کیفیت توان اعوجاجی انجام شده‌است. با استفاده از نتایج جدول (۳) مشخص می‌گردد که بارهای متفرقه شامل بیمارستانها، کارخانجات سیمان، هتل‌ها و دانشگاهها و بارهای مسکونی توجه به میزان ترکیب بار آن، بدترین تاثیر را بر مسایل کیفیت توان دارد، اگرچه مقدار THD بار مسکونی در بین ۴ نوع بار در مرتبه سوم قرار دارد.

جدول (۳) میزان ترکیب بار و مقدار شاخص کیفیت توان اعوجاجی

نوع بار	تجاری	اداری	مسکونی	متفرقه
THD%	۲۶/۲۶	۱۲/۱۹	۲۴/۶۰	۳۳/۰۱
رتبه‌بندی THD	۲	۴	۳	۱
شاخص کیفیت توان اعوجاجی	۱۵/۶۰	۱۰/۱۰	۲۴/۳۶	۹/۴۱
نسبت شاخص کیفیت توان اعوجاجی	۰/۲۵۱۵	۰/۱۸۳۳	۰/۳۴۱۹	۰/۱۹۵۴
رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک	۲	۴	۱	۳
نسبت توان اعوجاجی	۰/۳۹۱۴	۰/۲۵۶۶	۰/۶۰۹۰	۰/۲۲۱۸

بر این اساس علی‌رغم آنکه بارهای متفرقه دارای بیشترین میزان THD% هستند، اما از آنجایی که توان اعوجاجی آنها در مقایسه با بارهای مسکونی و تجاری کمتر است، سهم آلودگی آن در شبکه کمتر می‌باشد. در مقایسه با ارتباط بین شاخص کیفیت توان اعوجاجی و توان اعوجاجی با مقایسه یک به یک شاخص کیفیت توان اعوجاجی و ضریب توان اعوجاجی (DR) بدست می‌آید. بردار D_R برابر با $[0.1854, 0.2232, 0.2510, 0.3425]^t$ بر مجموع کل توانهای اعوجاجی بدست می‌آید. این مساله موید آن است که مقدار D_R یک بار متناظر با مقدار شاخص کیفیت توان اعوجاجی آن است. بنابراین، شاخص کیفیت توان اعوجاجی پیشنهادی را میتوان بعنوان یک شاخص تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی کیفیت توان بکار برده که در آن تنها

THD جریان‌های اندازه‌گیری طبق جدول (۱) و جریان‌های تخمین زده‌شده، در جدول (۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول (۲) مقایسه THD جریانهای تخمین‌زده شده و اندازه‌گیری شده

نوع بار	تجاری	اداری	مسکونی	متفرقه
THD جریانهای اندازه‌گیری شده (%)	۲۶/۲۶	۱۲/۱۹	۲۴/۶۰	۳۳/۰۱
THD جریانهای تخمین‌زده شده (%)	۲۳/۳۰	۱۰/۲۸	۲۱/۱۶	۳۰/۲۶

همانگونه که از جدول (۲) مشخص است بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده اختلاف وجود دارد. این اختلافات غیرقابل انتظار نیست، زیرا جریان‌های تخمین‌زده شده با فرض آن است که ولتاژ هارمونیک PCC تنها در اثر بارهای هارمونیک فیدر نمونه ایجاد شده‌است، در صورتیکه در محل بارهای هارمونیک فیدرهای مجاور نیز در اعوجاج ولتاژ هارمونیک PCC تاثیر دارند بگونه‌ای که ولتاژ PCC اعوجاجی می‌تواند کیفیت توان جریان تمام بارها را (اعم از خطی و غیرخطی) بخاطر افزایش THD، کاهش دهد. از طرفی اختلاف بین THD تخمینی و THD اندازه‌گیری شده ناشی از تنوع بارهای موجود در شبکه نیز می‌باشد.

۵-۳- تعیین رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک

با میزان ترکیب بار و THD تخمین زده شده، شاخص کیفیت توان اعوجاجی برای هر یک از بارها بوسیله رابطه (۱) قابل تعیین است. بنابراین مقادیر نرمالیزه شده شاخص کیفیت توان برابر با $[0.1954, 0.2033, 0.2515, 0.3419]^t$ در نهایت میزان ترکیب بار با توجه به مقدار شاخص کیفیت توان اعوجاجی در جدول (۳) قابل تعیین است. در جدول (۳)، رتبه‌بندی THD بر اساس میزان THD% انجام شده- است. مقدار شاخص کیفیت توان اعوجاجی هر بار تعیین می‌کند که هر بار به چه میزانی در اغتشاش PCC نقش

۷- مراجع

- [1] IEEE Standard for IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519, 1992.
- [2] Vlahinic, S., BrNobic, D. Stojkovic, N., "Indices for Harmonic Distortion Monitoring of Power Distribution Systems", IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 5, May 2009.
- [3] Electromagnetic Compatibility (EMC) -Part 3: Limits-Section VI: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems, IEC 61000-3-6, 1996.
- [4] T. Lin and A. Domijan, "On Power Quality Indices and Real Time Measurement," IEEE Trans on Power Del., Vol. 20, No. 4, pp. 2552-2562, Oct. 2005.
- [5] Y.J. Shin, E.J. Powers, M. Grady, and A. Arapostathis, "Power Quality Indices for Transient Disturbances," IEEE Trans on Power Del, Vol. 21, No. 1, pp. 253-261, Jan 2006.
- [6] K.A. Toh, Q.L. Tran, and D. Srinivasan, "Benchmarking a Reduced Multivariate PolyNomial Pattern Classifier," IEEE Trans on Pattern Anal, Vol. 26, No. 6, pp. 740-755, Jun. 2004.
- [7] K.A. Toh, W.Y. Yau, and X. Jiang, "A Reduced Multivariate Polynomial Model for Multimodal Biometrics and Classifiers Fusion," IEEE Trans on Circuits Syst., Vol. 14, No. 2, pp. 224-233, Feb 2004.
- [8] S. Lee and J.W. Park, "A Reduced Multivariate PolyNomial Model for Estimation of Electric Load Composition," IEEE Trans on Ind Appl, Vol. 44, No. 5, pp. 1333-1340, Sep/Oct 2008.
- [9] J. Mazumdar, R. G. Harley, F. C. Lambert, and G. K. Venayagamoorthy, "Neural Network Based Method for Predicting Nonlinear Load Harmonics," IEEE Trans on Power Electron, Vol. 22, No. 3, pp. 1036-1045, May 2007.
- [10] J. Mazumdar, R. G. Harley, F. C. Lambert, G. K. enayagamoorthy, and M. L. Page, "Intelligent Tool for Determining the True Harmonic Current Contribution of a Customer in a Power Distribution Network," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, No. 5, pp. 1477-1485, Sep./Oct. 2008.
- [11] B.Singh, V. Verma, and J. Solanki", Neural Network-Based Selective Compensation of Current Quality Problems in Distribution System", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007.
- [12] S. Mishra, C. N. Bhende, and B. K. Panigrahi, "Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using S-Transform and Probabilistic Neural Network", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, January 2008.
- [13] S. Lee, J. W. Park, G. Venayagamoorthy, "New Power Quality Index in a Distribution Power System by Using RMP Model", IEEE Trans on Industry applications, Vol. 46, No. 3, May/June 2010.
- [14] S. Baek and J.W. Park, "Nonlinear Controller Optimization of a Power System Based on Reduced Multivariate Polynomial Model", Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, Georgia, USA, June 14-19, 2009.

شکل موج جریان بارهای غیرخطی نیاز است. بر اساس رابطه (۱۶)، توان اعوجاجی بطور مستقیم به ضریب توان وابسته است، که یک شاخص مهم برای ارزیابی کیفیت توان انتقالی است. یکی از برتری‌های عملی شاخص کیفیت توان اعوجاجی پیشنهادی، امکان تعیین بارهای غیرخطی مضر و غیر مضر بر روی کیفیت توان شبکه در نقطه PCC است، بدون اینکه بطور مستقیم، آن بارها اندازه‌گیری شده باشند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک شاخص کیفیت توان جدید برای تعیین میزان ترکیب چندین بار غیرخطی در شبکه توزیع برق هرمزگان پیشنهاد شد که تنها از شکل موج جریان استفاده می‌کند. محاسبه شاخص کیفیت توان اعوجاجی نیازمند محاسبه میزان ترکیب بارها و THD جریان بارها است. میزان ترکیب بار توسط مدل چندجمله‌ای چندمتغیره تقلیل یافته تخمین زده شد. مدل مذکور برای پیش‌بینی هارمونیکهای جریان‌های اندازه‌گیری شده در هنگام اغتشاش در ولتاژ PCC نیز کاربرد دارد. این مدل میتواند بدون قطع بارها از PCC با سرعت همگرایی بالا و داشتن دقت مناسب بکار برده شود. با بکارگیری مدل مذکور در شبکه توزیع برق هرمزگان، رتبه‌بندی آلودگی هارمونیک ناشی از بارهای غیرخطی مشخص شد. بر این اساس بارهای مسکونی علی‌رغم میزان THD کمتر (رتبه سوم) نسبت به بقیه بارها، به علت داشتن توان اعوجاجی بیشتر، دارای بیشترین میزان آلودگی هارمونیک می‌باشد. آنچه در این باره حائز اهمیت است، مد نظر قرار گرفتن میزان %THD در محاسبه شاخص کیفیت توان اعوجاجی می‌باشد. انتظار می‌رود که شاخص کیفیت توان جدید پیشنهادی برای فراهم کردن اطلاعات مهم برای کنترل و کسب داده از سیستم و یا اندازه‌گیری‌های فراساختاری برای نظارت و تنظیم کیفیت توان با روشهای موثر استفاده گردد.