

Harmonic Assessment of the Distribution Network based on Load Type Classification (Field Study)

Hadi Afkar^{1*}, Mostafa Esmaeeli²

¹ Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
h-afkar@tvu.ac.ir

² Faculty of Computer and Industrial Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran
esmaeeli@birjandut.ac.ir

Keywords:

current harmonics
power quality
harmonic assessment
distribution network

Abstract: One of the main and important problems of power quality in the power distribution network is harmonic pollution. Understanding and quantifying the level of harmonics in the network is very important before proposing any suitable method to reduce the harmonic problems in the network as well as the network development plan. In this regard, in this paper, according to the classification of customers in the power distribution network and based on the most significant number of customers in the network, electrical loads are classified into four categories: residential, commercial, office, and combinatorial. Then the harmonic evaluation of the power distribution network for each type is carried out. In order to make the evaluation more operational and practical, two new harmonic indices are proposed as well as a new way of expressing the total current harmonic distortion. Considering that it can be assumed that each type of loads injects similar harmonics into the network, analyzing the measurement results for each type of load shows the harmonic behavior of each type of load in the distribution network to a large extent, which in the development and loading of distribution substations is very useful. According to the results, the current harmonic distortion of the load types is categorized as 1. office 2. commercial 3. residential 4. combinatorial in order from high to low. Based on this, it is possible to consider the range of harmonic factor K for combinatorial loads around 3, residential loads around 3.5, commercial loads around 5, and office loads around 11. Simulation results using MATLAB software show that third-order harmonic compensation can improve the total current harmonic distortion for office, residential, and combinatorial loads by up to 40%, and for commercial loads by up to 30%.

Original Research Article

Paper History:

Received: 29/12/2022

Accepted: 23/5/2023

How to cite this article: Afkar, H., Esmaeeli, M., "Harmonic Assessment of the Distribution Network based on Load Type Classification (Field Study)", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 2, PP. 18-31, 2023.
<https://doi.org/10.22052/JEEM.2023.252472.0>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

One of the fundamentally important problems of power quality in power distribution networks is harmonic pollution. Understanding and quantifying the level of harmonics in the network are very important before proposing any suitable method to for reduction in the harmonic problems in networks as well as in networks' development plan.

Materials and Methods

In this regard, in this paper, according to the

classification of customers and their numbers in power distribution networks, electrical loads were classified into four categories: residential, commercial, office, and combinatorial. Then, the harmonic evaluation of the power distribution network for each type was carried out. In order to make the evaluation more operational and practical, two new harmonic indices as well as a new way of expressing the total current harmonic distortion were proposed. While considering the possibility of injection of similar harmonics by each type of

loads into the network, the analysis of measurement results for each type of loads showed the harmonic behavior of each type of loads in the distribution network to a large extent. These results proved very useful for the development and loading of distribution substations.

Discussion and Results

In general, similar harmonic behaviors can be observed for each type of loads. The results of comparing harmonic behaviors of different loads are shown in the following table.

Table: Summary of load measurement results

load type	K Factor 95%	The contribution of the maximum neutral current%		Contribution of THDi harmonic components in peak load%		Allowed TDD within 7 days %	TDDi 95%	THDi 95%	Loading within 7 days %
		unbalance	3th harmonic	5th harmonic	3th harmonic				
Office	11	30	65	15	80	90	6	60	15
Residential	3	15	80	11	85	60	7	25	45
	3.5	20	76	5	83	100	4	35	15
Commercial	4	16	80	12	80	66	10	45	36
	5	7	91	16	78	62	11	50	50
Combinatorial	3	8.5	90	7	85	48	9.5	30	65
	2	20	78	7	80	73	7.5	20	55

According to the results obtained from the comparison of the harmonic behavior of the load types in distribution networks, the load types based on the amount of current harmonic distortion can be classified from high to low as: office, commercial, residential, and combinatorial ones. The combinatorial load includes a set of office, commercial, and residential loads. Comparing the measurement results of the combinatorial load with its subset loads showed less current harmonic distortion. These results showed harmonic overlap. It can be concluded that in order to improve the harmonic behavior of the network, it is better to include a set of different types of loads in each substation or distribution feeder if it is possible. Based on the measurement results, it can be seen that, despite high harmonic distortion, low loading has caused an amount of current TDD to be placed within the standard range; therefore, considering the harmonic behavior of loads is very important in developing and increasing the loading of a substation. According to these results, it is possible to consider the range of harmonic factor K for combinatorial loads around 3, residential loads around 3.5, commercial loads around 5, and office loads around 11. The results showed that the main problem of the current harmonic distortion in the distribution network is the third order harmonic. Thus, the third order harmonic includes a significant part of the current THD. In addition, a significant increase in the neutral current and related problems are also due to this harmonic component. Therefore, the most important action that can be undertaken to reduce the current THD in the distribution network should be a reduction in the third order harmonic of the current. In turn, this will result in a significant reduction in the neutral current. In this regard, in this study, the measured loads were simulated using MATLAB software by

considering the compensation of 90% of the third order harmonic of the current. As the simulation results showed, by correcting or compensating the third order harmonic for all types of network loads, a significant part of the THD of the current could be reduced. At the same time, it helped reduce the current passing through the neutral. Simulation results showed that the third-order harmonic compensation could improve the total current harmonic distortion for office, residential, and combinatorial loads by up to 40%, and for commercial loads by up to 30%.

Conclusion

In this paper, the harmonic behavior of various loads in distribution networks was evaluated. Based on this, according to the largest number of customers in distribution networks, electric loads were classified into four categories: Residential, commercial, office, and combinatorial. In order to evaluate the harmonic behavior of different types of loads, first the sample substations was selected in such a way that the dominant load was included in the classification considered in this paper. In line with the goals of the paper and for more easier operationalization and expression of the harmonic behavior of different loads, a new way of expressing the standard permissible value of the total current harmonic distortion was proposed along with two new indicators. In this regard, harmonic measurement was performed for each type of loads for one week, and the results of the measurement were analyzed. The analyses of the measurement results for each type of loads showed a harmonic behavior of each type of loads in distribution networks to a large extent. This result proved very useful for the development and loading of distribution substations.

ارزیابی هارمونیکی شبکه توزیع بر مبنای طبقه‌بندی نوع بار (مطالعه میدانی)

هادی افکار^{۱*}، مصطفی اسماعیلی^۲

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

h-afkar@tvu.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی کامپیوتر و صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

esmaeeli@birjandut.ac.ir

چکیده: یکی از مشکلات اصلی و مهم کیفیت توان در شبکه توزیع نیروی برق، آلودگی هارمونیکی است. قبل از پیشنهاد هر روش مناسبی برای کاهش مشکلات هارمونیکی در شبکه و همچنین برنامه توسعه شبکه، درک و کمی کردن سطح هارمونیکی در شبکه برق بسیار مهم است. در این راستا، در این مقاله، با توجه به دسته‌بندی مشترکین در شبکه توزیع نیروی برق و بر اساس بیشترین تعداد مشترکین در شبکه، بارهای الکتریکی در چهار دسته خانگی، تجاری، اداری و ترکیبی طبقه‌بندی شده و ارزیابی هارمونیکی شبکه توزیع برای هر نوع بار به صورت میدانی انجام می‌شود. در جهت عملیاتی و کاربردی تر کردن بیشتر ارزیابی، دو شاخص هارمونیکی جدید و همچنین نحوه جدید بیان اعوجاج هارمونیکی کل جریان پیشنهاد می‌شود. با توجه به اینکه می‌توان فرض کرد هر دسته از بارها هارمونیکی‌های مشابهی به شبکه تزریق می‌کنند، تحلیل و بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری برای هر نوع بار، رفتار هارمونیکی هر نوع بار را در شبکه توزیع برق تا حدود زیادی نشان می‌دهد که در توسعه و بارگذاری پست‌های توزیع بسیار مفید است. با توجه به نتایج، میزان اعوجاج هارمونیکی جریان به ترتیب از زیاد به کم به صورت اداری، تجاری، خانگی و ترکیبی دسته‌بندی می‌شود. بر این اساس می‌توان محدوده ضریب هارمونیکی K را برای بارهای ترکیبی حدود ۳، خانگی حدود ۳/۵، تجاری حدود ۵ و اداری حدود ۱۱ در نظر گرفت. نتایج شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که با جبران‌سازی هارمونیکی مرتبه سوم می‌توان میزان اعوجاج هارمونیکی را برای بارهای اداری، خانگی و ترکیبی تا ۴۰ درصد و برای بار تجاری تا ۳۰ درصد بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی:

هارمونیکی جریان

کیفیت برق

ارزیابی هارمونیکی

شبکه توزیع برق

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

۱. مقدمه

امروزه به دلیل عوامل متعددی نظیر تجهیزات بار حساس تر به تغییرات توان، افزایش سطح هارمونیکیها در سیستم قدرت، افزایش آگاهی مشترکین در مورد مسائل کیفیت توان و اتصالات شبکه که سبب تشدید تأثیر شکست هریک از اجزای شبکه می‌شود، کیفیت توان بیشتر مورد توجه مشترکین و شرکت‌های برق قرار گرفته است. از طرفی دیگر، رشد فناوری‌های الکترونیکی و ظهور صنایع مدرن به خصوص در بخش الکترونیک قدرت باعث گسترش اعوجاج هارمونیکی در شبکه‌های توزیع شده است [۱-۳].

از سوی دیگر، عدم توانایی در حذف کامل مؤلفه‌های هارمونیکی، مقتضیات بارها و شبکه‌های توزیع، تغییرات و گسترش شبکه‌های قدرت، عواملی هستند که باعث پذیرش اجباری هارمونیکیها در شبکه‌های توزیع می‌شوند. به‌طور کلی هارمونیکی‌های جاری شده در شبکه‌های توزیع باعث ایجاد اختلال در جریان برق، افت کیفیت توان و کاهش بازدهی سیستم می‌شوند. خطرات اصلی مرتبط با هارمونیکیها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۴ و ۵]:

- اضافه‌بار شبکه توزیع به دلیل افزایش جریان‌های مؤثر؛
- اضافه‌بار هادی‌های نول؛
- اضافه‌بار، ارتعاش و پیری زودرس ژنراتورها، ترانسفورماتورها و موتورها و نیز افزایش صدای ترانسفورماتور؛
- اضافه‌بار و پیری زودرس خازن‌های اصلاح ضریب توان؛
- اعوجاج ولتاژ تغذیه که می‌تواند به بارهای حساس آسیب بزند؛
- اعوجاج در شبکه‌های ارتباطی و خطوط تلفن. تمام این اختلالات دارای تأثیرات اقتصادی است؛
- پیری زودرس تجهیزات به معنی جایگزینی زودتر آن‌هاست، مگر اینکه در طراحی اولیه ظرفیت خیلی زیاد در نظر گرفته شده باشد.
- اضافه‌بار در شبکه توزیع به معنی ظرفیت نامی بالاتر تجهیزات، افزایش سطح قدرت برای مشترک صنعتی و افزایش تلفات توان.
- اعوجاج جریان غیرمنتظره باعث قطع برق و توقف تولید می‌شود.

با پیچیده شدن شبکه‌های قدرت، لزوم بررسی و شناخت دقیق اثر هارمونیکی بیش از پیش محسوس بوده و جزء روش مطالعات یک سیستم نوین قدرت است. ایجاد هارمونیکی که معلول کاربرد سیستم‌های جدید می‌باشد، مسائل حادی را در سیستم موجب

گردیده است؛ در نتیجه باید خسارات فنی ناشی از وجود هارمونیکی در یک مصرف‌کننده از دید شبکه و تأثیر هارمونیکی روی تلفات و ظرفیت انتقالی خطوط و تلفات و خسارات ناشی از هارمونیکیها روی شبکه بررسی شده و راهکارهایی برای کاهش تأثیر هارمونیکی حاصل از مشترکین بر شبکه‌های توزیع ارائه شود. مطالعات هارمونیکی سیستم قدرت را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: ۱. تعریف هارمونیکی و مشکلات مرتبط به هارمونیکیها و تأثیر آن بر سیستم قدرت و سایر بارهای حساس [۶]؛ ۲. ارزیابی هارمونیکیها در سیستم قدرت با استفاده از ابزار اندازه‌گیری [۷]؛ ۳. تخمین هارمونیکی با استفاده از تکنیک‌های حوزه‌ی زمان (فیلترهای پایین گذر، بالاگذر و میان‌گذر)، تکنیک‌های حوزه‌ی فرکانس (FFT و ویولت) و تکنیک‌های هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی و منطق فازی) [۸]؛ ۴. روش‌های کاهش هارمونیکی که می‌توانند فیلترهای پسیو، فیلترهای قدرت اکتیو و فیلترهای هیبرید [۹] باشد.

ارزیابی هارمونیکیها اولین گامی است که باید برای بهبود کیفیت توان در شبکه توزیع انجام شود. پس از انجام این مرحله است که می‌توان روشی برای کاهش اعوجاج هارمونیکی در سیستم قدرت انتخاب کرد. هارمونیکیها نتیجه تعداد روزافزون وسایل الکترونیک قدرت هستند. این وسایل امروزه به دلیل قابلیت‌های خود برای کنترل دقیق فرایند و مزایای صرفه‌جویی در انرژی، بسیار فراوان‌اند. نمونه‌های معمول این تجهیزات شامل درایوهای سرعت متغیر در صنعت و لامپ‌های فلورسنت فشرده در مناطق تجاری و مسکونی می‌شوند [۱۰]. جریان‌های هارمونیکی در میان عمده‌ترین مشکلات مرتبط با کیفیت برق وجود دارند. استانداردهای بین‌المللی برای کمک به طراحان تجهیزات و تأسیسات، محدودیت‌های انتشار هارمونیکی را تعیین کرده‌اند؛ بنابراین اثر غیرمنتظره و منفی هارمونیکیها نباید به وجود آید. به‌موازات درک بهتر اثرات، راه‌حل‌ها توسط صنعت توسعه یافته است. بدین ترتیب مطالعات هارمونیکی شبکه توزیع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و باید بارهای الکترونیکی شبکه، به خصوص بارهای الکترونیکی مدرن مورد ارزیابی هارمونیکی قرار گیرند [۱۱]؛ لذا در راستای مطالعات هارمونیکی شبکه، تخمین رفتار هارمونیکی‌های بارهای مختلف از اهمیت بالایی در برنامه‌ریزی آینده شبکه توزیع برق، به‌ویژه بارگذاری ترانسفورماتورها برخوردار است.

مطالعات متعددی برای شناسایی نه تنها منابع جریان هارمونیکی، بلکه همچنین برای بررسی مکانیزم‌های کاهش انتشار و همچنین تأثیرات آن‌ها در شبکه‌های توزیع برق انجام شده است [۱۲]. در

آن در جهت توسعه و برنامه‌ریزی شبکه توزیع به‌خصوص تعیین ظرفیت پست‌ها، با الگوی بارهای مختلف استفاده کرد. در این راستا، با توجه به بیشترین تعداد مشترکین در شبکه توزیع، بارهای الکتریکی در چهار دسته خانگی، تجاری، اداری و ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند که بار ترکیبی مجموعه‌ای از بارهای اداری، تجاری و خانگی است. سپس برای ارزیابی هارمونیک انواع بار، ابتدا پست‌های نمونه در شبکه انتخاب می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که بار غالب آن در طبقه‌بندی مدنظر این مقاله قرار گیرد. برای هر نوع بار دو پست انتخاب شده است (با توجه به محدودیت، اندازه‌گیری برای بار اداری در یک پست انجام شده است). در راستای عملیاتی کردن و بیان راحت‌تر رفتار هارمونیک بارهای مختلف، نحوه بیان جدیدی در مقدار مجاز استاندارد اعوجاج هارمونیک کل جریان به‌همراه دو شاخص جدید پیشنهاد می‌شود. بدین منظور مقدار مجاز THDi برحسب مقدار بارگذاری هر نوع بار بیان می‌شود و دو شاخص سهم مؤلفه هارمونیک در THD جریان (PCHDh¹) و سهم مؤلفه هارمونیک در جریان نول (PCIn¹) پیشنهاد می‌گردد. اندازه‌گیری هارمونیک برای هر نوع بار به‌مدت یک هفته انجام شده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به‌طور خلاصه مهم‌ترین دستاوردهای این مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- ارزیابی و تعیین اعوجاج هارمونیک انواع بار (خانگی، تجاری، اداری و ترکیبی) در شبکه توزیع نیروی برق؛
- ارائه شیوه جدید در بیان مقدار مجاز استاندارد اعوجاج هارمونیک کل جریان در جهت بیان راحت و کاربردی‌تر؛
- پیشنهاد دو شاخص کاربردی: سهم مؤلفه هارمونیک در THD جریان (PCHDh) و سهم مؤلفه هارمونیک در جریان نول (PCIn).

ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است که در بخش دوم روش انجام مطالعه شامل پارامترهای ارزیابی پیشنهادی و نحوه اندازه‌گیری آن‌ها بیان شده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری در بخش سوم بیان و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز در این بخش ارائه می‌گردد و در انتها، در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲. روش مطالعه

ارزیابی شبکه توزیع را می‌توان با طبقه‌بندی منابع هارمونیک به کلاس‌های محدود ساده کرد. در این مقاله، طبقه‌بندی بر اساس نوع

کنار آن، مطالعات مختلفی در زمینه هارمونیک در شبکه توزیع انجام شده است. در مرجع [۱۳] روشی عملی را برای تخمین سطوح هارمونیک ولتاژ در نقاط اتصال مصرف‌کنندگان خانگی ارائه می‌دهد که بر مبنای اطلاعات جمع‌آوری شده از کتورهای هوشمند است. در مرجع [۱۴] روشی مبتنی بر شبکه عصبی برای ارزیابی تأثیر تغییر امپدانس شبکه بر روی سهم هارمونیک بار در شبکه توزیع برق، با استفاده از داده‌های میدانی واقعی ارائه می‌شود. در راستای بررسی هارمونیک بارهای خانگی، مرجع [۱۵] روشی را برای تخمین اعوجاج هارمونیک این بارها در سیستم‌های توزیع پیشنهاد می‌کند. مرجع [۱۶] تجزیه و تحلیلی بر روی داده‌های میدانی جمع‌آوری شده از مکان‌های مختلف سیستم‌های توزیع خانگی در آمریکای شمالی ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در مرجع [۱۶]، هارمونیک مرتبه سوم برای بارهای خانگی، برجسته‌ترین مؤلفه است. در مرجع [۱۷] تخمین منبع هارمونیک در شبکه توزیع، مورد بحث قرار می‌گیرد که هدف آن ارائه اطلاعات به اپراتور شبکه در مورد حضور احتمالی بارهای تولید هارمونیک در شبکه است. روشی برای ارزیابی سطوح هارمونیک در امتداد فیدرهای توزیع شعاعی فشار متوسط در مرجع [۱۸] ارائه شده که بر روی یک شبکه واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۹] روشی برای شناسایی و دسته‌بندی اغتشاشات کیفیت توان ارائه شده است که هارمونیک‌ها را شامل نمی‌شود. در مرجع [۲۰] نیز روشی برای جداسازی سهم میزان هارمونیک شبکه و مشترک در نقطه اتصال ارائه شده است.

بر این اساس کمتر به مقایسه رفتار هارمونیک انواع بارهای الکتریکی در شبکه توزیع برق به‌صورت میدانی و پیش‌بینی رفتار هارمونیک آن‌ها پرداخته شده است.

در شرکت‌های توزیع نیروی برق، مشترکین با توجه به نوع مصرف خود به ۶ تعرفه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: خانگی، تجاری، صنعتی، عمومی، کشاورزی و روشنایی معابر. مشترکین خانگی بخش اعظمی از مشترکین و سهم بزرگی از مصرف برق در هر استان را به خود اختصاص می‌دهند. برای مثال، در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی ۸۲/۵ درصد از مشترکین در تعرفه خانگی قرار دارند. پس از آن بیشترین تعداد مشترک، مربوط به مشترکین با بارهای تجاری و اداری می‌شود که زیرمجموعه تعرفه عمومی قرار می‌گیرند [۲۱].

هدف از این مقاله، ارزیابی هارمونیک انواع بار در شبکه توزیع است، به‌طوری‌که بتوان با تخمین رفتار هارمونیک برای انواع بار، از

1. Participation of Component h in Harmonic Distortion (PCHDh)
2. Participation of Component h in Neutral Current (PCIn)

شبکه توزیع و بدون تنظیم خاصی قابل دسترسی است؛ بنابراین با دانستن میزان مجاز THD جریان، بررسی رفتار هارمونیکی شبکه و میزان انحراف هارمونیک‌های جریان از مقدار مجاز استاندارد به‌سادگی و بدون نیاز به دانش خاصی قابل دسترسی است که می‌تواند توسط تکنسین‌های شرکت توزیع برق به‌راحتی انجام شود. این موضوع در شرکت‌های توزیع برق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. می‌توان حداکثر مقدار THDi جریان مجاز را بر مبنای حداکثر TDD مجاز محاسبه کرد. حداکثر TDD مجاز طبق استاندارد تعیین شده است [۱۱]. با توجه به رابطه بین TDD و THD:

$$TDD = THD_i \frac{I_1}{I_a} \quad (1)$$

و:

$$TDD = THD_i \frac{I_1}{I_a} \quad (2)$$

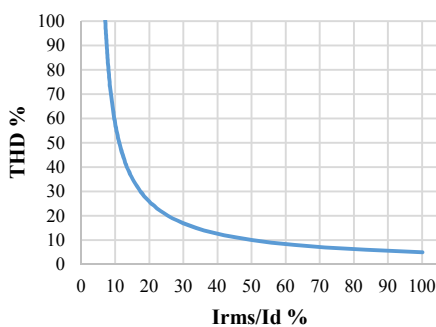
$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}$$

خواهیم داشت:

$$TDD = \frac{THD_i}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \frac{I_{rms}}{I_a} \quad (3)$$

که در آن I_a ماکزیمم جریان دیماند بار و $\frac{I_{rms}}{I_a}$ میزان بارگذاری بار است. بر طبق (۳) و با جایگذاری مقدار حداکثر مجاز TDD مقدار حداکثر مجاز THDi به دست می‌آید که متناسب با بارگذاری بار خواهد بود.

در این مقاله برای بارهای تحت بررسی مقدار حداکثر مجاز TDD بر طبق استاندارد صنعت برق ایران [۱۱] ۵ درصد است. بدین ترتیب منحنی تغییرات حداکثر THDi مجاز برحسب بارگذاری‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی تغییرات THD مجاز جریان در بارگذاری‌های مختلف بار

استفاده از این روش پیشنهادی، وضعیت اعوجاج هارمونیکی بار و مقایسه با استاندارد را به‌خصوص برای شرکت‌های توزیع برق

بار انجام می‌شود. در شبکه توزیع مجموعه‌ای از مشترکین خانگی، تجاری و اداری وجود دارد. لذا می‌توان مبنای طبقه‌بندی بار را در انواع مشترکین شبکه قرار داد. با توجه به اینکه هر دسته بار عمدتاً دارای انواع مصرف‌کننده‌های مشابه‌اند، می‌توان فرض کرد که هر دسته بار تقریباً دارای رفتار هارمونیک مشابهی هستند. در این مقاله با توجه به فراوانی بارها در پست‌های شبکه توزیع فشارضعیف، بارها در چهار دسته اداری، خانگی، تجاری و ترکیبی طبقه‌بندی شده و مورد ارزیابی هارمونیکی قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه تمرکز اصلی این مطالعه بر روی فیدرهای شهری بوده و عموماً این فیدرها مشترکین صنعتی ندارند، در این مطالعه بارهای صنعتی در نظر گرفته نشده‌اند. از طرفی دیگر، عموماً بارهای صنعتی مختلف دارای ماهیت و مصرف‌کننده‌های مشابه نیستند، لذا این بارها دارای رفتار هارمونیکی مشابه نخواهند بود.

۱.۲. پارامترهای ارزیابی

به‌منظور بررسی هارمونیک‌ها در شبکه توزیع، شاخص‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شوند که اصلی‌ترین آن اعوجاج هارمونیکی کل است. استفاده از شاخص هارمونیکی کل به‌تنهایی، اطلاعات هارمونیکی بار و شبکه را به‌طور ملموسی بیان نمی‌کند؛ لذا در این مقاله ضمن معرفی شاخص اعوجاج هارمونیکی کل، دو شاخص جدید پیشنهاد می‌گردد. استفاده از این دو شاخص به‌خوبی رفتار هارمونیکی بار را بیان کرده و تحلیل هارمونیکی بارها را در شبکه توزیع ساده‌تر و عملیاتی‌تر می‌کند. به‌علاوه مقایسه بین بارهای مختلف را به‌راحتی ممکن می‌سازد.

۱.۱.۲. شاخص اعوجاج هارمونیکی کل

عموماً اعوجاج هارمونیکی جریان بر اساس دو شاخص اعوجاج هارمونیکی کل (THD^1) و اعوجاج دیماند کل (TDD^2) بیان می‌شوند [۲۲].

برطبق استاندارد IEEE 519، میزان حداکثر مجاز اعوجاج هارمونیک جریان در شبکه بر اساس TDD بیان می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر مقدار اعوجاج هارمونیکی جریان مجاز وابسته به میزان بارگذاری شبکه خواهد داشت؛ لذا در مطالعات هارمونیکی در شبکه توزیع دقت اندازه‌گیری TDD جریان از اهمیت زیادی برخوردار است. اندازه‌گیری TDD مستلزم تنظیم دقیق میزان ماکزیمم جریان دیماند بار در دستگاه اندازه‌گیری است. درمقابل، اندازه‌گیری THD جریان توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در

1. Total Harmonic Distortion
2. Total Demand Distortion

$$1 = \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I_{rms}}\right)^2 \quad (8)$$

بر اساس (۷) و (۸) سهم هر کدام از مؤلفه‌های هارمونیک جریان در مقدار مؤثر جریان نول برحسب درصد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$PCIn = \left(\frac{I_h}{I_{rms}}\right)^2 \times 100 \quad (9)$$

۴.۱.۲. ضریب هارمونیک K^۱

یکی از شاخص‌های مهم برای هارمونیک‌های جریان ضریب هارمونیک K می‌باشد. این شاخص در برنامه‌ریزی برای بارگذاری ترانسفورماتورها و همچنین طراحی آن‌ها برای بارهای هارمونیک از اهمیت ویژه‌ای در شبکه‌های توزیع برخوردار است. فاکتور K یک ضریب اصلاح ظرفیت برای ترانسفورماتور است. این ضریب زمانی به کار می‌رود که بارهای ترانسفورماتور جریان غیر سینوسی بکشند. به عبارت دیگر این ضریب برای اصلاح ظرفیت ترانسفورماتور در شرایط بارهای هارمونیک به کار می‌رود. برطبق استاندارد ضریب K مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱].

$$K \text{ Factor} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h \times h)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2} \quad (10)$$

که در آن h مرتبه هارمونیک و I_h جریان متناظر با آن هارمونیک است.

بر این اساس برای به دست آوردن ظرفیت مناسب و همچنین توسعه بارها برای ترانسفورماتور موجود، تعیین ضریب K برای بارهای مختلف بسیار مهم است؛ لذا یکی از اهداف مهم این مقاله در طبقه‌بندی بارها، تعیین حدودی ضریب K برای انواع بار است که می‌تواند در برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توزیع برق کمک بزرگی به شرکت‌های توزیع کند.

۲.۲. اندازه‌گیری

در راستای ارزیابی هارمونیک شبکه بر اساس نوع بار، ابتدا پست‌های نمونه در شبکه انتخاب شدند. پست‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بار غالب آن در طبقه‌بندی مدنظر این مقاله قرار گیرد. برای هر نوع بار دو پست انتخاب شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود برای بار اداری، اندازه‌گیری‌ها برای این نوع بار فقط در یک پست انجام شده است. بدین منظور این پست‌ها شامل پست با بار اداری، پست با بار خانگی، پست با بار تجاری و پست با بار ترکیبی‌اند. اندازه‌گیری به کمک دستگاه اندازه‌گیری کیفیت توان ION7650، در طی بازه یک‌هفته‌ای انجام می‌شود. پست‌های منتخب در شبکه توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی، شهر بیرجند، واقع شده‌اند. این پست‌ها

و بدون نیاز به افراد متخصص در زمینه مطالعات هارمونیک، به سادگی نشان می‌دهد.

۲.۱.۲. شاخص درصد سهم مؤلفه‌های هارمونیک در THD جریان (PCHDh)

تعیین میزان سهم هریک از مؤلفه‌های هارمونیک در اعوجاج هارمونیک کل در ارزیابی دقیق هارمونیک بارها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر بسیار مفید است؛ لذا نیاز است تا میزان سهم هریک از مؤلفه‌های هارمونیک در THD جریان بار محاسبه شود. رابطه میزان اعوجاج هارمونیک کل با اعوجاج هارمونیک هریک از مؤلفه‌ها به صورت زیر بیان می‌شود.

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} (HD_h)^2} \quad (4)$$

که در آن HD_h اعوجاج هارمونیک مؤلفه h می‌باشد. لذا برطبق رابطه (۴) برای هر مؤلفه هارمونیک h خواهیم داشت:

$$1 = \sum_{h=2}^{hmax} \left(\frac{HD_h}{THD_i}\right)^2 \quad (5)$$

بر اساس رابطه (۵) سهم هر کدام از مؤلفه‌های هارمونیک در THD جریان برحسب درصد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$PCHDh = \left(\frac{HD_h}{THD_i}\right)^2 \times 100 \quad (6)$$

۳.۱.۲. شاخص درصد سهم مؤلفه‌های هارمونیک در اندازه جریان نول (PCIn)

یکی از مسائل مهم در سیستم‌های توزیع سه‌فاز چهارسیمه، جریان نول است. وجود جریان بالا در سیم چهارم در شبکه توزیع تأثیر منفی روی ترانسفورماتورها و ژنراتورها گذاشته و باعث تشدید اثرات منفی هارمونیک‌ها و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع چهارسیمه می‌شوند [۲۳]. وجود جریان نول می‌تواند ناشی از نامتعادلی بار و وجود هارمونیک‌های مضارب سوم در جریان بار باشد؛ لذا با توجه به اینکه هارمونیک‌های مضارب سه تماماً از سیم نول عبور می‌کنند، وجود بارهای هارمونیک می‌تواند بر روی مسائل مرتبط با سیم نول مؤثر باشد. در نتیجه تعیین میزان سهم هارمونیک‌ها در جریان سیم نول، یکی از جنبه‌های مهم ارزیابی هارمونیک بارها در سیستم‌های توزیع سه‌فاز چهارسیمه است.

مقدار مؤثر جریان را می‌توان طبق رابطه زیر بیان کرد:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2} \quad (7)$$

برطبق رابطه (۷) خواهیم داشت:

دارای ولتاژ ۲۰kV/۴۰۰V بوده و اندازه‌گیری‌ها در سمت فشارضعیف انجام شده است. جدول (۱) مشخصات پست‌های تحت اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

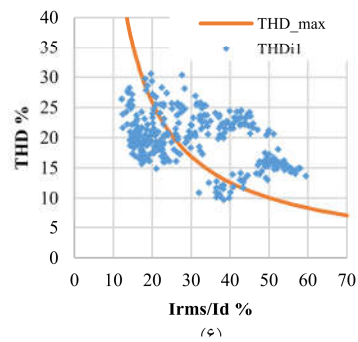
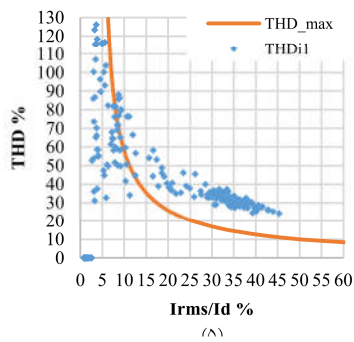
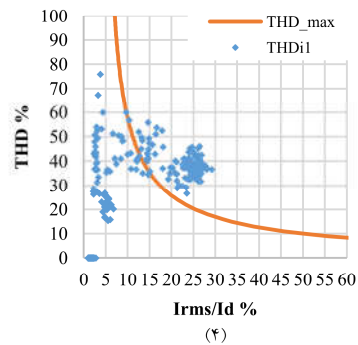
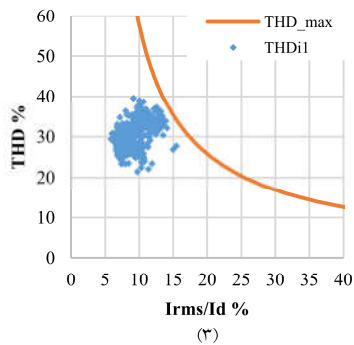
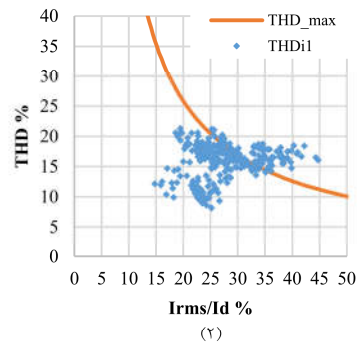
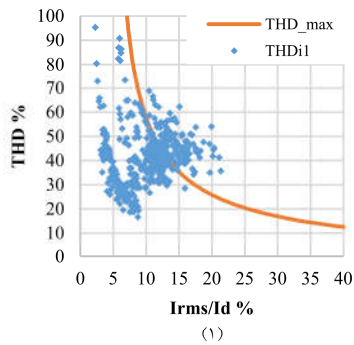
شکل (۲) نصب دستگاه اندازه‌گیری را در یکی از پست‌های منتخب نشان می‌دهد.



شکل (۲): اندازه‌گیری شاخص‌های هارمونیک توسط ION7650

جدول (۱): مشخصات پست‌های تحت اندازه‌گیری

نوع بار	ولتاژ	ظرفیت ترانسفورماتور	ضریب توان در پیک بار	حداکثر درصد بارگذاری	تعداد مشترک
اداری	۴۰۰V	۳۱۵ kVA	۰/۹۵	۱۵	اختصاصی
خانگی	۴۰۰V	800 kVA	۰/۹۵	۴۵	۳۸۵
	۴۰۰V	800 kVA	۰/۹۷	۱۵	۲۹۵
تجاری	۴۰۰V	100 kVA	۰/۹۱	۳۶	۳۸
	۴۰۰V	100 kVA	۰/۹	۵۰	۵۷
ترکیبی	۴۰۰V	800 kVA	۰/۹۶	۶۵	۲۱۲
	۴۰۰V	1250 kVA	۰/۹	۵۵	۷۳۳



شکل (۳): تغییرات THD جریان برحسب میزان بارگذاری برای یک‌فاز، (۱) بار اداری، (۲) بار خانگی ۱، (۳) بار خانگی ۲، (۴) بار تجاری ۱، (۵) بار تجاری ۲، (۶) بار ترکیبی ۱ و (۷) بار ترکیبی ۲

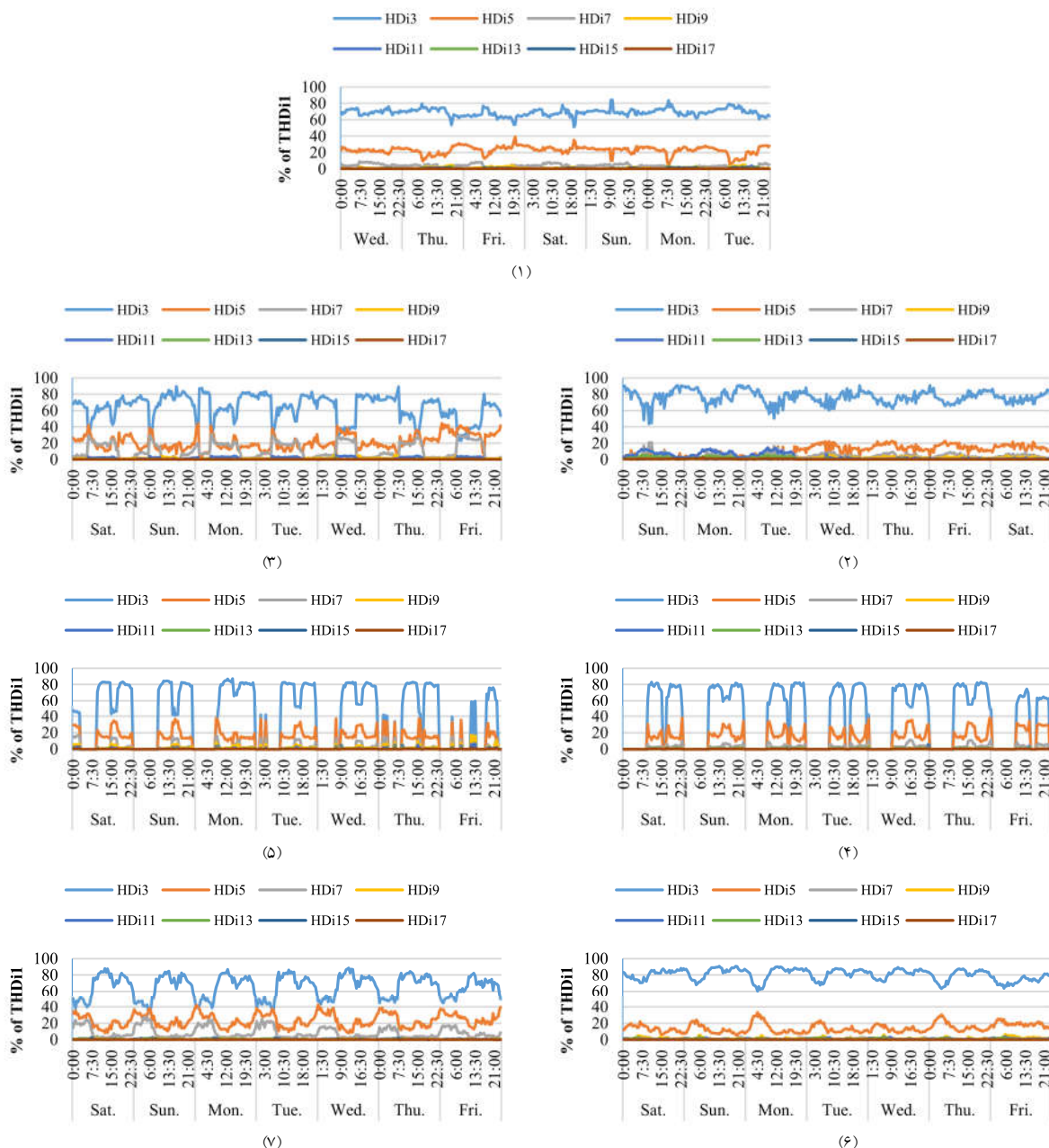
۳. نتایج و تحلیل

شکل (۳) نتایج حاصل از اندازه‌گیری THD جریان برای یک‌فاز را برحسب میزان بارگذاری در بارهای اداری، خانگی، تجاری و ترکیبی نشان می‌دهد. برطبق شکل (۳)، همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، با استفاده از روش پیشنهادی در نمایش میزان THDi به راحتی می‌توان وضعیت هارمونیک بار و مقایسه با مقدار مجاز استاندارد را به دست آورد.

درصد سهم مؤلفه‌های هارمونیک مرتبه سوم تا هفدهم در

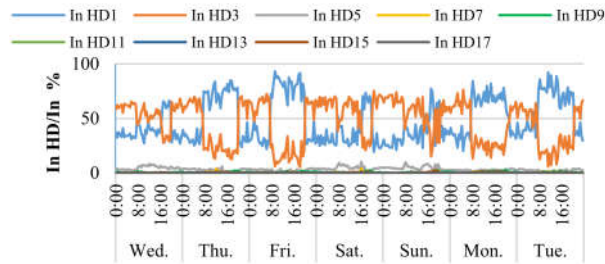
THD جریان (PCHDh) برای بارهای مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اکثر بارهای شبکه توزیع هارمونیک مؤلفه سوم، در زمان پرباری، دارای بیشترین سهم در اعوجاج هارمونیک جریانی است.

شکل (۵) درصد سهم مؤلفه‌های هارمونیک در اندازه‌گیری جریانی نول (PCIn) را برای مرتبه اول تا هفدهم برحسب درصد، در بازه اندازه‌گیری و برای بارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، در بازه اندازه‌گیری به‌خصوص در ساعات پیک هارمونیک‌ها سهم بالایی را در جریانی نول دارند.

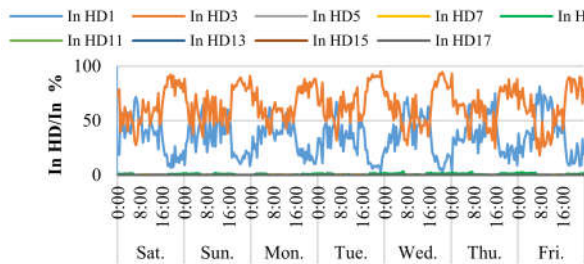


شکل (۴): درصد سهم مؤلفه‌های هارمونیک مرتبه سوم تا هفدهم در THD جریان (PCHDh). (۱) بار اداری، (۲) بار خانگی، (۳) بار خانگی

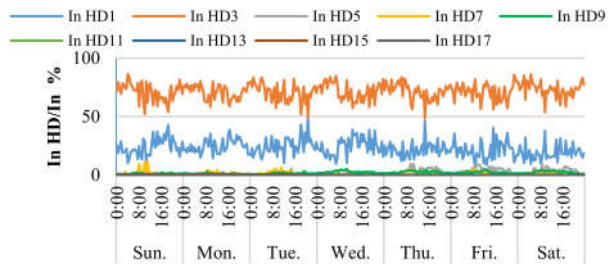
۲، (۴) بار تجاری، (۵) بار تجاری، (۶) بار ترکیبی، (۷) بار ترکیبی



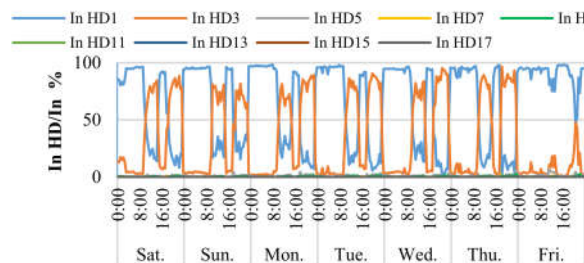
(۱)



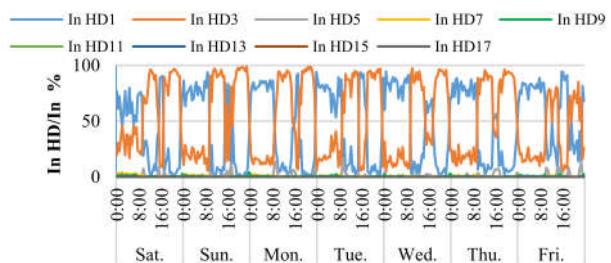
(۳)



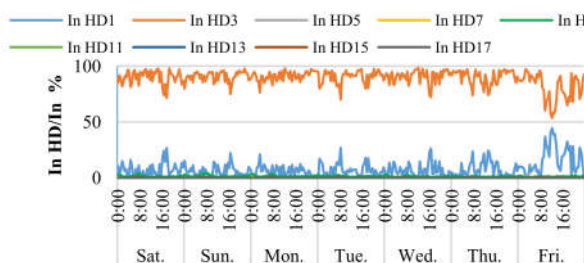
(۲)



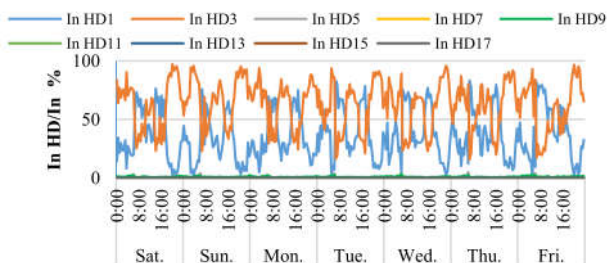
(۵)



(۴)



(۷)



(۶)

شکل (۵): درصد سهم مؤلفه‌های هارمونیک مرتبه سوم تا هفدهم در اندازه جریان نول (PCIn)، (۱) بار اداری، (۲) بار خانگی ۱، (۳) بار خانگی ۲، (۴) بار تجاری ۱، (۵) بار تجاری ۲، (۶) بار ترکیبی ۱ و (۷) بار ترکیبی ۲

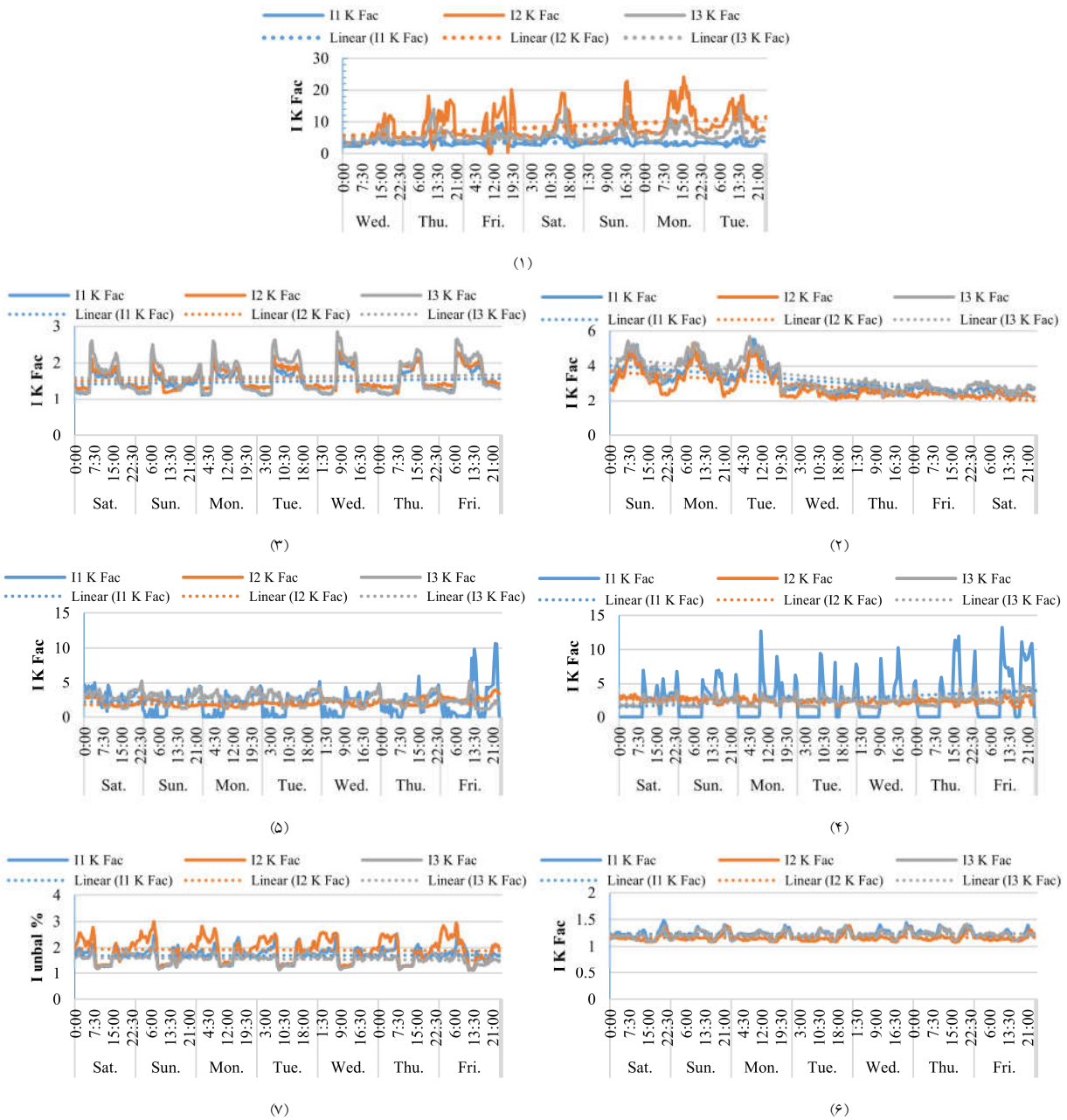
نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری برای بارهای اداری، خانگی، تجاری و ترکیبی (که از هرکدام از نوع بار دو مورد در نظر گرفته شد) برطبق شکل‌های (۳) تا (۶) به‌صورت تحلیلی و مقایسه‌ای در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج بیان‌شده در جدول (۲)، براساس میانگین نتایج برای سه‌فاز می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شد، میزان THDi وابسته به مقدار بارگذاری بار است. لذا برای ارزیابی رفتار هارمونیک انواع بار، حداکثر میزان بارگذاری برای هر نوع بار در جدول (۲) بیان شده است. این پارامتر حداکثر میزان بارگذاری میانگین سه‌فاز را

مشاهده می‌شود در این بین سهم هارمونیک مرتبه سوم در جریان نول، بسیار بیشتر از دیگر مؤلفه‌های هارمونیک است. به‌عبارت‌دیگر این هارمونیک مرتبه سوم است که باعث تشدید عبور جریان از سیم نول در ساعات پرباری می‌شود. درمقابل، در ساعات پرباری، هارمونیک مؤلفه اول که نشان‌دهنده نامتعادلی بار است، نقش کمتری در میزان جریان عبوری از سیم نول دارد.

شکل (۶) نمودار تغییرات ضریب K را برای انواع بار در بازه اندازه‌گیری نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دامنه تغییرات مشابهی را برای بارهای مشابه در نظر گرفت.

برای بار در بازه اندازه‌گیری هفت‌روزه، برحسب درصد نشان می‌دهد. این نکته حائز اهمیت است که با توجه به اینکه حداکثر هارمونیک مجاز بار در بارگذاری‌های مختلف متفاوت است، در بارگذاری‌های مجدد پست‌ها حتماً باید به نوع بار و رفتار هارمونیک آن توجه شود. لذا همان‌طور که بیان شد، تخمین رفتار هارمونیک انواع بار در شبکه توزیع، هدف اصلی این مقاله است.



شکل (۶): تغییرات ضریب K، (۱) بار اداری، (۲) بار خانگی ۱، (۳) بار خانگی ۲، (۴) بار تجاری ۱، (۵) بار تجاری ۲، (۶) بار ترکیبی ۱ و (۷) بار ترکیبی ۲

(C₉₅) برای TDD جریان بار در بازه اندازه‌گیری است. مقدار TDD مجاز در بازه هفت‌روزه درصد احتمال قرارگیری میزان TDD جریان بار را در مقدار مجاز استاندارد نشان می‌دهد. پارامتر 95% K Factor میزان تخصیص یافته برای ضریب K هارمونیک جریان را نشان می‌دهد که برابر با شاخص توزیع تجمعی 95 درصد (C₉₅) برای ضریب K در بازه اندازه‌گیری هفت‌روزه است.

پارامتر 95% THDi میزان تخصیص یافته برای THD جریان سه‌فاز بار را نشان می‌دهد که برابر با شاخص توزیع تجمعی 95 درصد (C₉₅) برای THDi جریان بار در بازه اندازه‌گیری است. این مقدار برای بارهای اداری حدود 60 درصد، تجاری حدود 50 درصد، خانگی حدود 35 درصد و ترکیبی حدود 30 درصد است. 95% TDDi میزان تخصیص یافته برای TDD جریان سه‌فاز بار را نشان می‌دهد که برابر با شاخص توزیع تجمعی 95 درصد

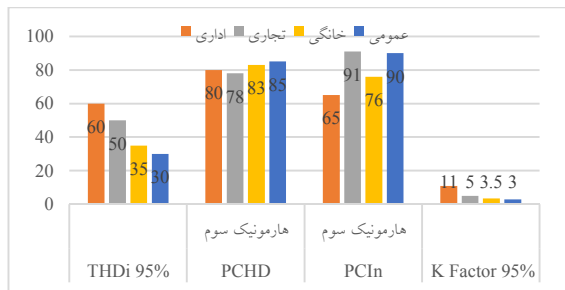
جدول (۲): خلاصه نتایج اندازه‌گیری انواع بار (میانگین سه‌فاز)

K Factor %۹۵	سهم ماکزیمم جریان نول %		سهم مؤلفه‌های هارمونیک THDi در بار پیک %		TDD مجاز در بازه هفت‌روزه %	TDDi 95%	THDi 95%	بارگذاری در بازه هفت‌روزه %	نوع بار
	هارمونیک سوم	هارمونیک پنجم	هارمونیک سوم	هارمونیک پنجم					
۱۱	۳۰	۶۵	۱۵	۸۰	۹۰	۶	۶۰	۱۵	اداری
۳	۱۵	۸۰	۱۱	۸۵	۶۰	۷	۲۵	۴۵	خانگی
۳/۵	۲۰	۷۶	۵	۸۳	۱۰۰	۴	۳۵	۱۵	
۴	۱۶	۸۰	۱۲	۸۰	۶۶	۱۰	۴۵	۳۶	تجاری
۵	۷	۹۱	۱۶	۷۸	۶۲	۱۱	۵۰	۵۰	
۳	۸/۵	۹۰	۷	۸۵	۴۸	۹/۵	۳۰	۶۵	ترکیبی
۲	۲۰	۷۸	۷	۸۰	۷۳	۷/۵	۲۰	۵۵	

به طوری که این امر موجب کاهش قابل ملاحظه جریان نول نیز خواهد شد.

با توجه به نتایج می‌توان محدوده ضریب هارمونیک K را برای بارهای ترکیبی حدود ۳، خانگی حدود ۳/۵، تجاری حدود ۵ و اداری حدود ۱۱ در نظر گرفت. استفاده از این مقادیر می‌تواند کمک شایانی به تعیین ظرفیت ترانسفورماتورها و همچنین افزایش بارگذاری آن‌ها در شبکه توزیع کند.

بر این اساس، نتایج به دست آمده از مقایسه انواع بار بر اساس جدول (۲) در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): خلاصه نتایج اندازه‌گیری انواع بار

۱.۳. نتایج شبیه‌سازی جبران‌سازی هارمونیک سوم

برطبق نتایج به دست آمده در بخش قبل، مشکل اصلی آلودگی هارمونیک در شبکه توزیع نیروی برق هارمونیک مؤلفه سوم است. در این راستا سریع‌ترین و مؤثرترین راهکار برای بهبود کیفیت توان شبکه توزیع جبران هارمونیک سوم است. بر همین اساس به کمک نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی برای جبران‌سازی هارمونیک مرتبه سوم، در این مطالعه انجام گردید. در این شبیه‌سازی میزان جبران هارمونیک مرتبه سوم ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. جدول (۳) میزان اعوجاج هارمونیک انواع بارهای مورد مطالعه را با جبران‌سازی ۹۰ درصدی هارمونیک مؤلفه سوم جریان بارها نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، به‌طور کلی می‌توان رفتارهای مشابه هارمونیک را برای هر نوع بار مشاهده کرد.

نتایج به دست آمده از جدول (۲) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد. از مقایسه رفتار هارمونیک انواع بار در شبکه توزیع، می‌توان انواع بار را بر مبنای میزان اعوجاج هارمونیک جریان به ترتیب از زیاد به کم به صورت اداری، تجاری، خانگی و ترکیبی دسته‌بندی کرد.

بار ترکیبی مجموعه‌ای از بارهای اداری، تجاری و خانگی را شامل می‌شود. مقایسه نتایج اندازه‌گیری بین بار ترکیبی و بارهای زیرمجموعه آن، اعوجاج هارمونیک جریان کمتری را نشان می‌دهد. این نتایج همپوشانی هارمونیک را به خوبی نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که به منظور بهبود رفتار هارمونیک شبکه بهتر است در صورت امکان، هر پست یا فیدر توزیع، مجموعه‌ای از انواع بارها را شامل شوند.

بر اساس نتایج اندازه‌گیری، دیده می‌شود که با وجود اعوجاج هارمونیک بالا، بارگذاری کم آن‌ها موجب شده است تا میزان TDD جریان در محدوده مجاز استاندارد قرار گیرد، لذا در توسعه و افزایش بارگذاری پست‌ها در نظر گرفتن رفتار هارمونیک بارها دارای اهمیت بالایی خواهد بود.

با توجه به جدول (۲)، برطبق پارامترهای PCHD و PCIn به راحتی می‌توان دریافت که مشکل اصلی اعوجاج هارمونیک جریان در شبکه توزیع، هارمونیک سوم است؛ به طوری که هارمونیک سوم بخش قابل توجهی از THD جریان را شامل می‌شود. علاوه بر این افزایش قابل ملاحظه جریان نول و مشکلات مرتبط با آن نیز مربوط به این مؤلفه هارمونیک است؛ لذا مهم‌ترین اقدام در جهت کاهش THD جریان در شبکه توزیع، باید در راستای کاهش هارمونیک سوم جریان باشد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله رفتار هارمونیک انواع بار در شبکه توزیع مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس با توجه به بیشترین تعداد مشترکین موجود در شبکه‌های توزیع، بارهای الکتریکی به چهار دسته خانگی، تجاری، اداری و ترکیبی دسته‌بندی شدند. برای ارزیابی رفتار هارمونیک انواع بار، ابتدا پست‌های نمونه به گونه‌ای که بار غالب آن در طبقه‌بندی مدنظر این مقاله قرار گیرد، انتخاب شدند. در راستای اهداف مقاله و عملیاتی کردن و بیان راحت‌تر رفتار هارمونیک بارهای مختلف، نحوه بیان جدیدی در مقدار مجاز استاندارد اعوجاج هارمونیک کل جریان به‌همراه دو شاخص جدید پیشنهاد گردید. در این راستا اندازه‌گیری هارمونیک برای هر نوع بار به مدت یک هفته انجام شد و نتایج حاصل از اندازه‌گیری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. تحلیل و بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری برای هر نوع بار، رفتار هارمونیک هر نوع بار را در شبکه توزیع تا حدود زیادی نشان می‌دهد که در توسعه و بارگذاری پست‌های توزیع بسیار مفید است. نتایج شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که با جبران‌سازی هارمونیک مرتبه سوم می‌توان میزان آلودگی هارمونیک شبکه توزیع نیروی برق را به میزان بالایی بهبود بخشید.

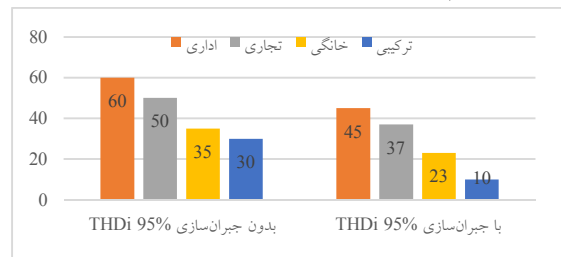
سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پروژه‌ای است که به سفارش شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی به انجام رسیده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های جناب آقای مهندس مهدی دادگر مدیرعامل محترم و همچنین همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس محمد کیان، کارشناس محترم گروه تحقیقات آن شرکت تشکر و قدردانی نمایند.

جدول (۳): میزان اعوجاج هارمونیک انواع بارها را با جبران‌سازی ۹۰ درصدی هارمونیک مؤلفه سوم جریان

نوع بار	اداری			خانگی		تجاری		ترکیبی	
	۱	۱۵	۲۳	۲	۱	۲	۱	۲	۱
THDi 95%	۴۵	۱۵	۲۳	۲۸	۳۷	۱۸	۱۰	۲	۱
TDDi 95%	۳/۵	۴/۵	۲	۶	۷	۵/۵	۴	۴	۵/۵
TDD مجاز در بازه هفت‌روزه %	۹۹/۵	۹۷	۱۰۰	۸۷	۷۰	۸۵	۱۰۰	۱۰۰	۸۵

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، با اصلاح و یا جبران‌سازی هارمونیک سوم برای انواع بارهای شبکه، می‌توان بخش قابل توجهی از THD جریان را کاهش داد و در کنار آن به کاهش جریان عبوری از سیم نول به میزان بالایی کمک کرد. مقدار THD جریان برای انواع بار قبل و بعد از جبران‌سازی ۹۰ درصد هارمونیک سوم در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): مقدار THDi قبل و بعد از جبران‌سازی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با جبران‌سازی ۹۰ درصدی هارمونیک مرتبه سوم، برای بارهای اداری، خانگی و ترکیبی تا ۴۰ درصد و برای بار تجاری تا ۳۰ درصد اعوجاج هارمونیک جریان کاهش می‌یابد که کمک بالایی به بهبود آلودگی هارمونیک و کاهش جریان عبوری از سیم نول شبکه توزیع نیروی برق خواهد کرد.

مراجع

- [1] Ansari, M.R., Mousavi Ghahfarokhi, M.S., and Safaei, S., "Power quality improvement in a steel plant by an optimized shunt active power filter based on developed p-q theory", Energy Engineering and Management, Vol. 11, No. 3, pp. 78-91, 2021, (In Persian), <https://doi.org/10.22052/11.3.3>.
- [2] Rohouma, W., and Balog, R.S., "D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads", Renewable Energy, Vol. 145, pp. 1449-64, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.134>.
- [3] Afkar, H., Shamsinejad, M.A., and Ebadian, M., "A grid-tie PV inverter with the ability to improve power quality under unbalanced and distorted source voltage conditions", Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 41, No. 7, pp. 622-634, 2018, <https://doi.org/10.1080/02533839.2018.1530951>.
- [4] Peronnet, J., *Electrical installation guide*, Schneider Electric, 2018.
- [5] Mohammadi, H.R., and Hajiakbari Fini M., "A novel control strategy for shunt active power filter in three-phase four-wire system to compensate harmonics, unbalance and reactive power", Energy Engineering and Management, Vol. 4, No. 2, pp. 2-9, 2014, (In Persian).
- [6] Kalair A., Abas N., Kalair A.R., Saleem Z., and Khan N., "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 78, pp. 1152-1187, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>.
- [7] Martin, A.D., Herrera, R.S., Vazquez, J.R., Crolla P., and Burt G.M., "Unbalance and harmonic distortion assessment in an experimental distribution network", Electric Power Systems

- Research, Vol. 127, pp. 271-279, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2015.06.005>.
- [8] Eslami, A., Negnevitsky, M., Franklin, E., and Lyden, S., "Review of AI applications in harmonic analysis in power systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 154, pp. 111897, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111897>.
- [9] Li, D., Wang, T., Pan, W., Ding, X., and Gong, J., "A comprehensive review of improving power quality using active power filters", *Electric Power Systems Research*, Vol. 199, pp.107389, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107389>.
- [10] Chamman, A., and Mrabet, B., "Experimental Quantification of Current Harmonics Injected by Compact Fluorescent Lamps Towards the Electrical Distribution Network", 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Yasmine Hammamet, Tunisia, 19-22 March, 2018, <https://doi.org/10.1109/SSD.2018.8570544>.
- [11] Halpin, M., *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Std 519, 2014.
- [12] Fonseca Buzo, R., de Oliveira, L., and Leão, F.B., "A new method for dimensioning and designing the zero-sequence electromagnetic filter considering system displacement power factor", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 35, No. 3, pp. 1071-1082, 2020, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2898153>.
- [13] Rodríguez-Pajarón, P., Hernández, A., and Milanović, J.V., "Estimation of harmonics in partly monitored residential distribution networks with unknown parameters and topology", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 13, No. 4, pp. 3014-3027, July 2022, <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3155976>.
- [14] Mazumdar, J., Harley, R.G., Lambert, F.C., Venayagamoorthy, G. K., and Page, M.L., "Intelligent tool for determining the true harmonic current contribution of a customer in a power distribution network", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, No. 5, pp. 1477-1485, Sept.-Oct. 2008, <https://doi.org/10.1109/IAS.2006.256597>.
- [15] Xiao, X., Li Z., Wang, Y., and Zhou, Y., "A practical approach to estimate harmonic distortions in residential distribution system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 36, No. 3, pp. 1418-1427, June 2021, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3008700>.
- [16] Wang, Y., Yong, J., Sun, Y., Xu, W., and Wong, D., "Characteristics of harmonic distortions in residential distribution systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 3, pp. 1495-1504, June 2017, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2606431>.
- [17] D'Antona, G., Muscas, C., Pegoraro, P.A., and Sulis, S., "Harmonic source estimation in distribution systems", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 10, pp. 3351-3359, Oct. 2011, <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2126910>.
- [18] Abdelrahman, S., and Milanović, J.V., "Practical approaches to assessment of harmonics along radial distribution feeders", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 34, No. 3, pp. 1184-1192, June 2019, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2901245>.
- [19] Nazari, S., Esmaeili, S., and Karimzadeh, F., "Detection and classification of single and multiple power quality disturbances based on independent component analysis", *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, Vol. 48, No. 1, pp. 382-392, 2018, (In Persian).
- [20] Fernandez, F., and Nair, P., "Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 7, No. 4, pp. 374-381, 2013, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0361>.
- [21] South Khorasan Power Distribution Company (SKEDC), "Statistical brochure of 1401", South Khorasan Power Distribution Company (SKEDC), 2022. [Online]. Available:<https://skedc.ir/uploads/amar/borooshor1401%2006%20%2031.jpg>.
- [22] Das, J.C., *Power System Harmonics in Power System Harmonics and Passive Filter Designs*. IEEE, 2015.
- [23] Zaveri, T., Bhalja, B.R., and Zaveri, N., "Comparison of control strategies for DSTATCOM in three-phase, four-wire distribution system for power quality improvement under various source voltage and load conditions", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, pp. 582-594, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.04>.