The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems
Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Online ISSN: 2980-8693

Design and Implementation of a Monitoring and Load Management System for Diesel Generators

Danyal Navid[1] | Mehdi Monadi[2*] | S. Sajad Moosapour[3]

1. M.Sc, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Email: danyal.navid1996@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Email: m.monadi@scu.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Email: s.moosapour@scu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 23 July 2025
Revised: 21 August 2025
Accepted: 21 December 2025
Published Online: 28 May 2026

Keywords:
Monitoring system,
Diesel generator,
Load reduction calculation,
Harmonics.

ABSTRACT

In this paper, a control system for monitoring and controlling the performance parameters of diesel generators has been designed and presented. In most existing monitoring and control systems for diesel generators, when the operational parameters of the generator exceed the permissible limits, the system shuts down the diesel generator and de-energizes the loads connected to it. However, in the proposed method, by accessing the breakers of the generator's output feeders, appropriate control commands are applied only to a portion of the loads. Moreover, to prevent the effect of non-linear loads on the generator's output voltage, the proposed monitoring system is equipped with a control algorithm that calculates the amount of load shedding required to return the voltage to the standard conditions and manages the loads connected to the generator accordingly. Furthermore, the proposed method is equipped with an adequate user interface and hence can be easily applied in industrial environments. The proposed load control algorithms also consider the effect of the nature of the load on the diesel generator's capacity reduction, and the effect of non-linear loads on the diesel generator's capacity reduction has also been considered.

Cite this article: Navid, D.; Monadi, M. & Moosapour, S. (2026). Design and Implementation of a Monitoring and Load Management System for Diesel Generators. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 251-272. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.399300.1172

© Danyal Navid, Mehdi Monadi, S. Sajad Moosapour **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.399300.1172

Introduction

Diesel generators are an important type of distributed generation system, responsible for providing primary or emergency power to some consumers. Due to their high reliability and relatively low cost, diesel generators are a suitable option for supporting the weak grid or those requiring a backup system. Diesel generators can only provide a stable and sustainable power supply if they are in good working condition and ready to operate. Accordingly, one of the most important issues in using these sources is the need to monitor their behavior and ensure their performance parameters comply with relevant standards. Given the importance of having a diesel condition monitoring system that allows for continued power generation under various conditions, a monitoring and control system has been presented and implemented in this paper. In this system, while assessing the performance parameters of the diesel generator against relevant standards, if parameters such as voltage and current harmonics exceed limits, the permissible capacity of the diesel is calculated, and appropriate commands are issued to disconnect some loads. This allows the diesel to return to permissible operating conditions, ensuring continued production and power supply to a portion of the loads. The particular importance

of the system proposed in this article is that, unlike most existing condition monitoring systems, the issue of capacity reduction due to the connection of non-linear loads is fully considered.

Materials and methods

A method is presented for determining the capacity reduction of diesel generators. This system calculates the permissible diesel capacity based on changes in loading conditions (connection of non-linear loads) and removes excess loads based on priorities defined in the controller. Moreover, an adaptive overload protection system is presented that can replace bimetallic overload current protection. On the other hand, the implementation of the proposed method, as an industrial software system, was done in the LabVIEW software. The implemented system can easily receive generator current and voltage through the interface hardware and activate the control system. By connecting to the measuring equipment, the monitoring and control software receives the measured data as well as the connection status of the loads and displays them simultaneously on the HMI pages. Moreover, to apply the control commands generated in this system, the feeders of the loads connected to the diesel generator must be equipped with breakers with automatic command capability.

Result

One of the important aspects of designing and presenting a control system is performing software tests before its hardware implementation. For this purpose, to test the proposed monitoring system in this paper, a connection between LabVIEW and MATLAB/Simulink software has been established. In fact, combining Simulink and LabVIEW provides a suitable structure for real-time software testing of control systems. In this structure, the monitoring system software is implemented in the LabVIEW environment, and simultaneously, a diesel generator and its loads, s, are simulated in MATLAB/Simulink. The data measured in Simulink, which includes voltages and currents of different parts of the simulated power system, is transferred to LabVIEW and injected into the proposed algorithm for the monitoring system. The proposed method was tested in this testbed by use of several load change scenarios. The results show that the method can provide an effective and acceptable performance and stabilize the operation of the study diesel generation in various working conditions.

Conclusion

Due to the need for continuous monitoring of the performance parameters of diesel generators, as well as the need to apply automatic control on these sources, this paper proposes a condition monitoring and load management system for diesel generators. In the proposed monitoring system, in addition to continuously monitoring the voltage and current status of the generator and preventing unauthorized loading on it, the status of voltage and current harmonics is also monitored. If the generated voltage exceeds the allowable harmonic limit, appropriate control commands will be issued to manage the loads connected to the diesel. In fact, this monitoring system addresses both the issue of overload adaptively and in proportion to the permissible loading of the diesel generator, and proposes a method to reduce the harmonic components of the voltage. In both cases, instead of needing to completely disconnect the generator loads, continuous operation is managed by removing one of the lower-priority loads.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

طراحی و پیاده‌سازی نرم‌افزاری سیستم پایش وضعیت و مدیریت بار برای دیزل ژنراتورها

دانیال نوید[۱] | مهدی منادی[۲*] | سید سجاد موسی‌پور[۳]

۱. کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز. رایانامه: danyal.navid1996@gmail.com

۲. نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه برق، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز. رایانامه: m.monadi@scu.ac.ir

۳. دانشیار گروه برق، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز. رایانامه: s.moosapour@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:
سیستم پایش،
دیزل ژنراتور،
محاسبهٔ کاهش بار،
هارمونیک.

چکیده

در این مقاله، یک سیستم نرم‌افزاری برای پایش پارامترهای عملکردی دیزل ژنراتورها طراحی و ارائه شده است. در بیشتر سیستم‌های پایش و کنترل موجود برای دیزل ژنراتور، معیار عملکرد سیستم پایش پس از خروج پارامترها از حدود مجاز، خاموش کردن دیزل ژنراتور و بی‌برق کردن همهٔ بارهای متصل به آن است. حال آنکه در روش پیشنهادی در این مقاله، با دسترسی سیستم کنترل به بریکرهای فیدرهای خروجی ژنراتور و در واقع با یکپارچه کردن کنترل فیدرهای خروجی و سیستم پایش ژنراتور، فرمان‌های کنترلی مناسب فقط به بخشی از بارها اعمال می‌شود. از سوی دیگر، برای جلوگیری از اثرات منفی بارهای غیرخطی بر کیفیت توان تولیدی ژنراتورهای ایزوله، سیستم پایش ارائه‌شده در این مقاله به یک الگوریتم کنترلی مجهز شده که در حضور بارهای غیرخطی، میزان کاهش بار مورد نیاز برای برگرداندن ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور به شرایط استاندارد را محاسبه و متناسب با آن مدیریت لازم را روی بارهای متصل به ژنراتور اعمال می‌کند. در حقیقت، سیستم پایش ارائه‌شده ضمن پایش درلحظه پارامترهای عملکردی دیزل ژنراتور و مقایسهٔ این پارامترها با محدوده‌های بیان‌شده در استانداردها، الگوریتم‌های کنترلی مورد نیاز برای حفظ عملکرد پایدار و ایمن ژنراتور و در عین حال تداوم برق‌رسانی به مصرف‌کننده‌ها را در خود دارد. روش پیشنهادی به یک رابط کاربری مجهز شده و به‌آسانی می‌توان آن را در محیط‌های صنعتی به کار برد.

استناد: نوید، دانیال؛ منادی، مهدی و موسی‌پور، سید سجاد (۱۴۰۵). طراحی و پیاده‌سازی نرم‌افزاری سیستم پایش وضعیت و مدیریت بار برای دیزل ژنراتورها. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۲) ۲۵۱-۲۷۲.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.399300.1172

© دانیال نوید، مهدی منادی، سید سجاد موسی‌پور

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.399300.1172

۱. مقدمه

دیزل ژنراتورها یکی از انواع مهم سیستم‌های تولید برق پراکنده هستند که تأمین برق اصلی یا اضطراری برخی از مصرف‌کننده‌ها را به عهده دارند. به‌دلیل قابلیت اطمینان بالا و هزینهٔ نسبتاً پایین، این ژنراتورها گزینه‌ای مناسب برای مکان‌هایی هستند که زیرساخت برق ضعیفی دارند و یا به یک سیستم پشتیبان نیاز داشته باشد. همچنین، با توسعهٔ استفاده از منابع تجدیدپذیر با ماهیت متغیر، همچون توربین‌های بادی، استفاده هم‌زمان این منابع و دیزل ژنراتورها به عنوان یکی از راه‌حل‌های غلبه بر چالش‌های مرتبط با ماهیت متغییر منابع تجدیدپذیر مطرح شده است [۱]. بدیهی است که دیزل ژنراتورها در صورتی می‌توانند به پایداری و تداوم تغذیهٔ مصرف‌کننده‌ها کمک کنند که خود در شرایط کاری مناسبی بوده و آماده‌به‌کار باشند. در حقیقت، بخش‌های مختلف الکتریکی و مکانیکی دیزل ژنراتور، به‌خصوص دیزل‌های بزرگ و حساس، همواره باید پایش شوند و در صورت خروج از محدودهٔ عملکرد مجاز، علاوه بر اعلام هشدارهای مناسب به بهره‌برداران، کنترل لازم برای برگرداندن ژنراتور به شرایط نامی و حفظ آن‌ها از آسیب‌های احتمالی نیز اعمال شود تا به این‌وسیله قابلیت اطمینان و بازده آن‌ها نیز افزایش یابد [۲]. بر این‌اساس، یکی از مسائل مهم در استفاده از این ژنراتور، پایش دقیق عملکرد آن‌ها و حصول اطمینان از تطابق پارامترهای عملکردی آن‌ها با استانداردهای مربوط به آن است [۳]. در نتیجه وجود سیستم‌های پایش و مدیریت عملکرد دیزل ژنراتورهای یکی از نیازهای اساسی بهره‌برداران صنعتی و از پایه‌های ایجاد صنایع نسل چهارم است [۲]. بدیهی است که سیستم پایش کارا، باید ضمن نظارت مداوم، الگوریتم‌ها و روش‌های مناسب برای تجزیه‌وتحلیل پارامترها و مشخص کردن وضعیت کاری دیزل ژنراتور در شرایط مختلف را داشته باشد [۴].

درخور یادآوری است که در طراحی سیستم پایش باید به این نکته توجه کرد که وضعیت کاری دیزل ژنراتورها باید از دو منظر مورد توجه باشد: (۱) از نظر حفظ ایمنی و سلامت ژنراتور؛ به این معنا که ادامهٔ کار ژنراتور در شرایط کار فعلی آن به بخش‌های مختلف دیزل ژنراتور آسیب وارد نکند و (۲) از نظر تطابق پارامترهای الکتریکی خروجی ژنراتور (به‌خصوص ولتاژ، فرکانس) با استانداردهای شبکه، به گونه‌ای که این پارامترها در محدودهٔ مجاز تعریف‌شده برای شبکه قرار گیرند. از این‌رو، در طراحی سیستم‌های پایش و مدیریت بار دیزل ژنراتورها باید موارد مختلفی مورد توجه قرار گیرد که در ادامه به این موارد خواهیم پرداخت. اولین موضوع مهم، انتخاب پارامترهای عملکردی مورد پایش و نیز تعیین معیارهای مناسب برای تشخیص وضعیت دیزل ژنراتور، بر اساس این پارامترها است. در حقیقت، در گام اول باید مشخص کرد که برای تعیین وضعیت عملکردی دیزل ژنراتورها، کدام‌یک از پارامترهای آن‌ها باید مورد سنجش و یا محاسبه قرار گیرد. همچنین، باید مشخص شود که این پارامترها باید در چه محدوده‌ای قرار گیرند تا وضعیت کاری دیزل ژنراتور به عنوان «عادی» شناخته شود و خروج از آن محدوده به عنوان تحت فشار قرار گرفتن دیزل ژنراتور تلقی شده و در نتیجه، نیاز به اعمال فرمان‌های کنترلی تشخیص داده شود. این موضوع با بررسی استانداردهای بین‌المللی در زمینهٔ بهره‌برداری از دیزل ژنراتورها محقق می‌شود. رایج‌ترین استانداردهای بهره‌برداری منابع تولید پراکنده و دیزل ژنراتورها عبارت‌اند از: استاندارد ISO-8528، استاندارد IEEE-519 و استاندارد IEEE-1547. این استانداردها از جنبه‌های مختلف به بررسی شرایط کاری و نیز تعریف محدودهٔ مجاز پارامترهای الکتریکی منابع تولید پراکنده پرداخته‌اند که در طراحی نرم‌افزار سیستم پایش ارائه‌شده در این مقاله به آن‌ها توجه شده است.

در پایش وضعیت دیزل ژنراتورها هم می‌توان از کمیت‌های الکتریکی و هم از کمیت‌های مکانیکی این دستگاه استفاده کرد. به عنوان مثال، در [۵] از تحلیل داده‌های مربوط به کمیت‌های مکانیکی، که توسط سنسورهای متصل‌شده بر بخش‌های مختلف دیزل ژنراتور اندازه‌گیری شده‌اند، برای پایش وضعیت آن استفاده شده است. این روش، که متکی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین است، ویژگی‌های حالت‌هایی که ماشین از کار عادی خارج شده را تشخیص می‌دهد و فرمان مناسب را ایجاد می‌کند. با وجود قابلیت‌های مهم این روش در شناسایی خطاهای داخلی ژنراتور، پیچیدگی‌های روش‌های متکی بر یادگیری ماشین و نیز اعمال خاموشی به همهٔ بارها پس از تشخیص اشکال در دیزل ژنراتور از چالش‌های این روش است. همچنین، روش‌های مبتنی بر پایش کمیت‌های مکانیکی، شبیه آنچه در [۶] ارائه شده است، عمدتاً نیازمند استفاده از سنسورهایی است که ممکن است همواره در دسترس نباشد. به علاوه، تحلیل کمیت‌های مکانیکی، همچون میزان لرزش دیزل ژنراتور، ممکن است بر اثر نویزهای

مکانیکی و محیطی مختلف دچار کاهش دقت شود [۴]. البته، استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری پارامترهای مکانیکی برای تشخیص خطاهای ایجادشده در بخش‌های متحرک موتور دیزل نتایج قابل قبول‌تری را فراهم می‌کند [۷]. در مقابل، تحلیل‌های مبتنی بر کمیت‌های الکتریکی، به‌خصوص جریان و ولتاژ، به دلیل در دسترس‌تر بودن سنسورهای اندازه‌گیری آن‌ها و نیز امکان استخراج سایر کمیت‌های الکتریکی، مثل توان و فرکانس، از داده‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ آن‌ها، از سادگی، ارزانی و سهولت پیاده‌سازی بیشتری برخوردار هستند. همچنین، تأثیرپذیری آن‌ها از نویزهای محیطی کمتر بوده و امکان پالایش نویزهای احتمالی نیز به‌خوبی فراهم است. بر این‌اساس، در مقالات مختلف استفاده از کمیت‌های الکتریکی برای پایش وضعیت عملکرد ژنراتورها مورد توجه بوده است. به عنوان نمونه، در پژوهش ارائه‌شده در [۲] داده‌های پایش‌شده توسط سیستم پیشنهادی، اندازهٔ کمیت‌های مختلف الکتریکی، همچون جریان و ولتاژ، و نیز کمیت‌های غیر الکتریکی، همچون سرعت دیزل و دمای دیزل است. این روش، مقادیر لحظه‌ای داده‌های اندازه‌گیری‌شده را مورد استفاده قرار می‌دهد و تحلیلی روی شکل موج‌های ولتاژ و جریان انجام نمی‌دهد. همچنین در این مقاله، پس از تجاوز هر یک از این کمیت‌ها از مقادیر ازپیش‌تعیین‌شده، هشدار مربوط به آن صادر شده، کل بار از روی دیزل برداشته شده و دیزل به طور کامل خاموش می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت کارایی استفادهٔ صرف از مقادیر لحظه‌ای کمیت‌های الکتریکی برای پایش وضعیت دیزل ژنراتور، در [۸]، پارامترهایی همچون مقادیر RMS و پیک مثبت و منفی ولتاژ خروجی ژنراتور نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، در صورتی که مقادیر پیک مثبت و منفی ولتاژ از حدود ازپیش‌تعیین‌شده تجاوز کنند، شرایط کار ژنراتور غیرنرمال تشخیص داده می‌شود. البته، مقادیر آستانه‌ای مورد استفاده در هر دو مقاله [۲] و [۸] اعداد ثابتی هستند که طی دورهٔ بهره‌برداری تغییر نمی‌کنند. به‌علاوه، در این دو مقاله نیز همچون سایر روش‌های بیان‌شده، پس از تشخیص هر نوع تجاوز کمیت‌های پایش‌شده از مقادیر آستانه‌ای ازقبل‌معین‌شده، ژنراتور به طور کامل بی‌بار می‌شود.

از سوی دیگر، دیزل ژنراتورها به دلیل آنکه عمدتاً، و به‌خصوص در شرایط کاربرد به عنوان برق اضطراری، به صورت مستقل از شبکه کار می‌کنند، جریان‌های هارمونیکی ناشی از وجود بارهای غیرخطی اثر قابل ملاحظه‌تری بر عملکرد آن‌ها خواهند داشت [۹]. تحلیل‌های انجام‌شده در [۹] نشان می‌دهد این هارمونیک‌ها تا حد قابل توجهی گشتاور الکترومغناطیسی این ژنراتورها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (تا ۱۶ درصد در تست‌های انجام‌شده در [۹]) که در نتیجه آن میزان لرزش و نوسان در ژنراتور به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. هارمونیک‌های جریان، همچنین باعث ایجاد هارمونیک‌های ولتاژ در خروجی ژنراتور شده و در نهایت، می‌تواند باعث خروج کیفیت توان تولیدی ژنراتور از حدود استاندارد شود. در نتیجه، وجود یک سیستم پایش مداوم، مستمر و درلحظه برای پایش هارمونیک‌های جریان و ولتاژ خروجی ژنراتور اهمیت زیادی دارد و این سیستم باید به طور مشخص علاوه بر بررسی کمیت‌های لحظه‌ای الکتریکی و مکانیکی دیزل ژنراتور، پارامترهای کیفیت توان آن را زیر نظر داشته باشند [۱۰]. این مسئله به‌خصوص از آن جهت مهم است که صرف نظر از ماهیت بار، جهت صدور مجوز اتصال یک ژنراتور به بارها و شبکه، لازم است میزان هارمونیک‌های ولتاژ خروجی آن کمتر از حد مشخصی باشد و در صورت تجاوز از این حد باید فرمان‌های کنترلی مناسب اعمال شود [۱۰]. استفاده از هارمونیک‌های جریان و ولتاژ ژنراتور همچنین در [۹] برای تشخیص خطاهای داخلی ژنزاتورها مورد توجه قرار گرفته است. هرچند در این حالت نیز پس از خطایابی، هشدار و سپس فرمان تریپ کلی ژنراتور صادر می‌شود و همهٔ بارهای متصل جدا می‌شوند. اثر وجود بارهای غیرخطی در [۱۱] هم به گونه‌ای دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی بیان می‌کند که جریان‌های هارمونیکی اعمالی روی ژنراتور و افزایش دمای ایجادشدهٔ ناشی از تلفات مرتبط با این هارمونیک‌ها می‌توانند اثراتی همچون کاهش عمر و تخریب زودهنگام سیم‌پیچ و عایق ژنراتور را به همراه داشته باشند. علاوه بر این، وجود این هارمونیک‌ها می‌تواند باعث ایجاد لرزش مکانیکی در ژنراتور و اثرات مخرب بعدی آن روی بخش‌های مکانیکی ماشین شود. در نتیجه، لازم است همواره میزان هارمونیک‌های جریان مورد پایش مداوم قرار گیرد و از حد مشخصی تجاوز نکند. به بیان دیگر، برای کاهش اثرات هارمونیک‌ها، لازم است میزان بار غیر خطی ژنراتورها محدود شده و یا ژنراتور با ظرفیتی کمتر از ظرفیت نامی خود بارگیری شود. به بیان دیگر، هنگام اتصال بارهای غیرخطی به ژنراتور، نمی‌توان از آن انتظار داشت که توان نامی خود را به طور کامل در محدودهٔ کیفیت توان استاندارد تحویل دهد. بررسی‌های انجام‌شده در [۱۲]

نشان می‌دهد اتصال یک یکسوساز به خروجی ژنراتور می‌تواند ظرفیت نامی آن را به ۸۵ درصد برساند. در نتیجه، سیستم‌های پایش وضعیت دیزل، باید قادر باشند که در هر لحظه بر اساس نوع بار متصل‌شده به ژنراتور و میزان هارمونیک‌های جریان آن، میزان کاهش بارگذاری مورد نیاز را محاسبه و اعلام کنند. در غیر این‌صورت، دیزل ژنراتور دچار افزایش دمای سیم‌پیچ می‌شود و سیستم حفاظت مجبور به قطع همهٔ بارهای متصل‌شده خواهد شد.

نکتهٔ درخور یادآوری دیگر آن است که همان‌گونه که بیان شد، یکی از اهداف اصلی طراحی سیستم‌های پایش وضعیت دیزل ژنراتور، حفظ ایمنی و سلامت دستگاه با اطمینان از تداوم کارکرد آن در شرایط مجاز است. بر این‌اساس، در بسیاری از سیستم‌های پیشنهادشده برای پایش وضعیت دیزل ژنراتورها، به محض خروج پارامترهای عملکردی پایش‌شدهٔ ژنراتور از محدودهٔ مجاز، فرمان قطع کامل بار و خاموشی ژنراتور صادر می‌شود. این در حالی است که در این قبیل شرایط، با مدیریت مناسب بار می‌توان از قطع کامل آن جلوگیری کرد و در حقیقت بدون خاموش کردن ژنراتور، بخشی از بارها را همچنان برق‌دار نگه داشت. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده، این عملکرد در بسیاری از مقالات پیشین دیده نمی‌شود و عملکرد سیستم پایش ارائه‌شده در آن‌ها به صورت جداسازی کامل بار تعریف شده است. این در حالی است که اصولاً پس از خروج برخی پارامترهای عملکردی ژنراتور از حد مجاز، اگرچه ژنراتور نمی‌تواند در توان نامی خودکار کند، اما امکان کار در توانی کمتر از ظرفیت نامی خود را خواهد داشت. این موضوع که با عنوان کاهش ظرفیت[1] شناخته می‌شود، یکی از موضوعات مهم در بهره‌برداری از ژنراتورها است و در استانداردها و مقالات مختلفی به آن اشاره شده است. به عنوان مثال، میزان کاهش ظرفیت ژنراتورها با افزایش دمای محیط در منابع [۱۳] و [۱۴] گزارش شده و در مرجع [۱۵] نیز میزان کاهش ظرفیت ناشی از اتصال بارهای غیرخطی به دیزل ژنراتورها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین، یکی از عوامل مهم در انتخاب سایز و ظرفیت دیزل ژنراتور، ماهیت بارهای متصل به آن است و ژنراتوری که به بارهای غیرخطی متصل شده است، باید توانی بیش از توان دیزلی داشته باشد که به بار خطی با توان بار مشابه متصل شده است. به بیان دیگر، یکی از موارد دیگر مؤثر در کاهش ظرفیت ژنراتورها، نوع بار متصل به آن‌هاست و لازم است در شرایط اتصال بارهای غیرخطی به این موضوع توجه کرد.

از سوی دیگر، یکی از موضوعات دیگری که در طراحی و پیاده‌سازی سیستم پایش اهمیت دارد، انتخاب یک محیط نرم‌افزاری مناسب برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های مورد نیاز آن سیستم است. در این زمینه، محیط‌های نرم‌افزاری گوناگونی در دسترس است که در این مقاله از برنامه‌نویسی در محیط LabVIEW استفاده شده است. LabVIEW به عنوان یک نرم‌افزار منبع باز با در اختیار قرار دادن توابع گوناگون، امکان پیاده‌سازی انواع الگوریتم‌های پایش و مدیریت فرایندها را به‌راحتی فراهم می‌آورد [۱۶]. ضمن آنکه اتصال آن به سخت‌افزارهای گوناگون به سهولت قابل انجام است. بر همین‌اساس، در پروژه‌های مختلفی از این نرم‌افزار به عنوان محیط طراحی سیستم پایش استفاده شده است. به عنوان مثال، در پژوهش ارائه‌شده در [۱۷] برای پایش و تجزیه‌وتحلیل بلادرنگ شرایط کار ژنراتورها از LabVIEW استفاده شده است. LabVIEW علاوه بر کارایی مناسب در اتصال به سخت‌افزارهای جانبی سیستم پایش (کارت‌های I/O، میکروپروسسورها و رله‌های انتقال‌دهندهٔ فرمان‌های کنترلی) امکان اتصال به نرم‌افزارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم‌های قدرت را نیز دارد. همچنین، در [۱۸] از ایجاد ارتباط بین نرم‌افزارهای LabVIEW و Simulink/Matlab برای شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتاییک و پیاده‌سازی الگوریتم ردیابی نقطهٔ حداکثر توان مورد نیاز این سیستم استفاده شده است. در این ساختار، سیستم قدرت (نیروگاه خورشیدی) در محیط Simulink و سیستم کنترل آن در LabVIEW شبیه‌سازی شده است. استفاده از این ساختار، این امکان را برای محققان فراهم می‌آورد که پس از انجام شبیه‌سازی‌های لازم و اطمینان از عملکرد سیستم کنترل، الگوریتم کنترلی پیاده‌سازی‌شده در LabVIEW را مستقیم روی میکروپروسسور بارگذاری کنند و شرایط را برای تست‌های سخت‌افزاری فراهم آورند. در تست‌های نرم‌افزاری انجام‌شده در این مقاله نیز از این ساختار استفاده شده است؛ به این معنا که سیستم قدرت، شامل دیزل ژنراتور، کنترل‌گرهای آن و بارهای متصل‌شده، در محیط Simulink شبیه می‌شوند و سپس، خروجی‌های این شبیه‌سازی به محیط LabVIEW منتقل می‌شوند؛ جایی که الگوریتم پایش و مدیریت بار دیزل قبلاً پیاده‌سازی شده است. همچنین، در ساختار مورد

1. de-rating

استفاده برای تعیین میزان دقت الگوریتم، سعی شده است با جداسازی شبیه‌سازی بخش‌های قدرت و الگوریتم پیشنهادی، امکان انتقال الگوریتم پایش روی میکروپروسسور سخت‌افزار آن، به‌راحتی فراهم شود. ضمن آنکه هر نوع تغییر در الگوریتم سیستم پایش را می‌توان پس از اعمال آن در محیط LabVIEW به‌آسانی به سخت‌افزار منتقل کرد.

۱-۱. اهداف مقاله و نوآوری

جدول ۱ خلاصه‌ای از مقایسهٔ روش‌های ارائه‌شده برای پایش دیزل ژنراتورها را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است، در روش‌های ارائه‌شده در مقالات پیشین، همواره پس از خروج دیزل از حالت‌های کار عادی، عملکرد سیستم پایش به صورت اعلام هشدار و سپس جداسازی کامل همهٔ بارها بوده است. این در حالی است که همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در صورت دسترسی به بریکرهای فیدرهای خروجی ژنراتور، ممکن است فقط با حذف برخی از بارها، دیزل ژنراتور بتواند به کار عادی خود ادامه دهد. از سوی دیگر در هیچ‌یک از این مقالات، میزان کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور، ناشی از اتصال بارهای غیرخطی، مورد توجه و محاسبه قرار نگرفته است. یادآوری این نکته لازم است که رله‌های حفاظتی دیزل ژنراتورها نیز نوعاً متناسب با ظرفیت نامی ژنراتورهای آن‌ها تنظیم می‌شوند. در نتیجه، در صورتی که هر نوع کاهش ظرفیتی ناشی از تغییرات دمای محیط، بارهای غیرخطی و یا سایر موارد در دیزل ژنراتور تشخیص داده شود، لازم است تنظیمات این رله‌ها نیز تغییر کنند. حال آنکه در حفاظت‌های جریانی مرسوم، تنظیمات رله‌های حفاظتی، به‌خصوص رله‌های جریانی تشخیص اضافه‌بار و اتصال کوتاه، معمولاً ثابت و بدون تغییر است. همچنین، در ستون اول از سمت چپ جدول ۱ نشان داده شده که اصولاً وضعیت عملکردی دیزل ژنراتور هنگام اتصال به بارهای غیرخطی در بسیاری از این مقالات مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به این نکات، هدفی که این مقاله دنبال می‌کند ارائهٔ روشی برای تکمیل روش‌های ارائه‌شده در قبل و پوشش دادن نکات درنظرگرفته‌نشده در آن‌ها و در نهایت، ارائهٔ یک سیستم کاراتر برای پایش و مدیریت بار دیزل ژنراتور است.

بر این‌اساس، در این مقاله یک سیستم نرم‌افزاری ارائه شده است که ضمن پایش درلحظه و به‌هنگام پارامترهای عملکردی دیزل ژنراتور، تحلیل کمیت‌های اندازه‌گیری‌شده در حوزهٔ زمان و فرکانس و مقایسهٔ این پارامترها با محدوده‌های بیان‌شده در استانداردها، الگوریتم‌های کنترلی مورد نیاز برای حفظ عملکرد پایدار و ایمن ژنراتور و در عین حال تداوم برق‌رسانی به مصرف‌کننده‌ها را در خود دارد. به بیان دیگر، در روش ارائه‌شده در این مقاله، با یکپارچه‌سازی کنترل فیدرهای خروجی دیزل ژنراتور با سیستم پایش وضعیت آن، در صورت تشخیص تجاوز از قیود استاندارد، میزان کاهش ظرفیت ژنراتور محاسبه شده و ضمن اعلام آن به بهره‌برداران، فرمان‌های کنترلی مناسب برای مدیریت و کاهش بار به فیدرهای خروجی ارسال می‌شود. اهمیت خاص سیستم پیشنهادشده در این مقاله آن است که به خلاف اغلب سیستم‌های پایش وضعیت موجود، مسئلهٔ کاهش ظرفیت ناشی از اتصال بارهای غیرخطی کاملاً مورد توجه قرار گرفته و پیاده‌سازی شده است. به طور خلاصه، در این مقاله موارد زیر ارائه شده است:

۱. با توجه به تأثیر هارمونیک‌های ناشی از بارهای غیرخطی بر عملکرد دیزل ژنراتور، سیستم پایش ارائه‌شده در این مقاله، با پایش میزان هارمونیک‌های جریان و ولتاژ در خروجی ژنراتور، میزان کاهش ظرفیت قابل تحویل ژنراتور از ظرفیت نامی آن را محاسبه کرده و با اعمال تغییراتی در شرایط بارگذاری، بارهای اضافه را طبق اولویت‌بندی معین‌شده برای سیستم پایش، حذف می‌کند. درخور یادآوری است که مقادیر ولتاژ و جریان پایش‌شده در این روش، به صورت پیوسته و درلحظه، هم در حوزهٔ زمان و هم در حوزهٔ فرکانس با استانداردهای بهره‌برداری ژنراتورها مقایسه می‌شوند.

۲. با توجه به محاسبهٔ میزان کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور، تنظیمات رله‌های حفاظتی جریانی بریکر خروجی ژنراتور نیز مداوم تغییر کرده و در حقیقت امکان پیاده‌سازی یک حفاظت اضافه جریان تطبیقی نیز فراهم آمده است.

۳. با یکپارچه‌سازی سیستم کنترل فیدرهای خروجی ژنراتور و سیستم پایش وضعیت آن، امکان اعمال فرمان‌های کنترلی به فیدرهای خروجی و در نتیجه، جلوگیری از جداسازی همهٔ بارهای متصل به ژنراتور، پس از خروج برخی از پارامترهای عملکردی ژنراتور از حدود مجاز، فراهم می‌آید. با استفاده از این ساختار، به جای آنکه در پاسخ به خروج یکی از پارامترها از حد مجاز، همهٔ بارها جدا شوند، سیستم سعی در اصلاح مقدار آن پارامتر با تغییر در بارگذاری روی دیزل ژنراتور خواهد داشت.

علاوه بر موارد بیان‌شده، پیاده‌سازی روش پیشنهادی در LabVIEW این امکان را فراهم کرده که نرم‌افزار توسعه‌داده‌شده در این مقاله به‌راحتی توسط سخت‌افزارهای واسطه، جریان و ولتاژ ژنراتور را دریافت و سیستم پایش وضعیت را به‌سادگی پیاده‌سازی کند.

ساختار بخش‌های بعدی این مقاله به این‌صورت است که در بخش ۲ به معرفی پارامترهای مهم در پایش وضعیت دیزل‌ها می‌پردازیم. بخش ۳ این مقاله، ساختار کلی سیستم پایش پیشنهادی را معرفی می‌کند و در بخش ۴ روش‌ها و فرمول مورد استفاده برای محاسبهٔ کاهش بار دیزل ژنراتور تشریح می‌شود. بخش ۵ الگوریتم کلی سیستم پایش و مدیریت بار پیشنهادی را توضیح داده است و در بخش ۶ ساختار نرم‌افزاری مورد نیاز برای تست الگوریتم پیشنهادی مطرح شده و نتایج این تست‌ها گزارش شده‌اند.

جدول ۱. مقایسهٔ روش پیشنهادی و مقالات مشابه

رفرنس	پارامترهای پایش‌شده	سیگنال خروجی	محاسبهٔ میزان کاهش ظرفیت ناشی از بار غیرخطی	تطبیق تنظیمات حفاظت با ظرفیت فعلی	بررسی اتصال بارهای غیرخطی
[۲]	اندازهٔ جریان و ولتاژ	آلارم قطع کامل بار	خیر	خیر	خیر
[۹]	اندازهٔ جریان و ولتاژ هارمونیک‌های جریان و ولتاژ	آلارم قطع کامل بار	خیر	خیر	خیر
[۱۹]	نوسانات ژنراتور	آلارم قطع کامل بار	خیر	خیر	خیر
[۵]	کمیت‌های مکانیکی	آلارم قطع کامل بار	خیر	خیر	خیر
[۶]	کمیت‌های مکانیکی	آلارم قطع کامل بار	خیر	خیر	خیر
[۱۰]	اندازهٔ جریان و ولتاژ هارمونیک‌های جریان و ولتاژ	قطع کامل بار	خیر	خیر	بله
[۲۰]	کمیت‌های مکانیکی اندازهٔ کمیت‌های الکتریکی	قطع کامل بار	خیر	خیر	خیر
روش پیشنهادی	اندازهٔ جریان و ولتاژ هارمونیک‌های جریان و ولتاژ	آلارم قطع برخی از بارها قطع کامل بار	بله	بله	بله

۲. پارامترهای مهم در پایش وضعیت دیزل ژنراتورها

اگرچه پارامترها و کمیت‌های گوناگونی را می‌توان به عنوان پارامترهای اصلی توصیف‌کنندهٔ رفتار دیزل ژنراتورها انتخاب کرد، برخی پارامترها، هم از نظر اثرگذاری بر کیفیت توان شبکه و هم از نظر تأثیرگذاری بر سلامت و ایمنی دیزل‌ها، از اهمیت خاصی برخوردارند. در سیستم پایش وضعیت ارائه‌شده در این مقاله، پارامترهای اصلی مورد بررسی عبارت‌اند از: اندازهٔ ولتاژ خروجی و هارمونیک‌های آن، اندازهٔ جریان دیزل ژنراتور و مؤلفه‌های هارمونیکی آن و درنهایت دمای دیزل ژنراتور. در ادامه، به معرفی بیشتر این پارامترها و محدودهٔ مجاز تعریف‌شده در سیستم پیشنهادی می‌پردازیم.

۲–۱. قیود اضافه ولتاژ

بدیهی است که مقدار مؤثر ولتاژ خروجی ژنراتور نباید از حد مجاز خارج شود، چرا که بر اثر خروج از حد مجاز، عایق‌های آن و نیز بارهای متصل‌شده تحت فشار قرار گرفته و احتمال وقوع اشکالات اساسی وجود دارد. بر این‌اساس، لازم است که وقوع اضافه ولتاژ به‌سرعت شناسایی و کنترل شود. در صورت عدم کنترل این اضافه ولتاژها، ژنراتور باید در زمان ازپیش‌تعیین‌شده‌ای از مدار خارج شود. معیار مورد استفاده در سیستم پایش ارائه‌شده در این مقاله، بر اساس محدودیت‌های تعریف‌شده در استاندارد مرجع [۲۱] برای ولتاژهای لحظه‌ای است.

۲-۲. قیود جریانی

یکی از محدودیت‌های مهم کاری ژنراتور، افزایش دما و گرم شدن سیم‌پیچ‌های مختلف آن است که عمدتاً به دلیل افزایش جریان اتفاق می‌افتد. افزایش جریان‌ها ناشی از اضافه‌بار شدن ژنراتورها و به بیان دیگر، ناشی از اعمال باری بیشتر از ظرفیت نامی ژنراتور در شرایط محیطی محل نصب آن است. اگرچه ژنراتورها به گونه‌ای ساخته می‌شوند که حدی از اضافه‌بار را می‌توانند تحمل کنند، مدت‌زمان تحمل اضافه جریان نمی‌تواند از مقدار مشخصی بیشتر شود. بر این‌اساس، ژنراتورها به رله‌های جریانی‌ای مجهز می‌شوند که نوعاً با استفاده از منحنی‌های زمان ـ معکوس عمل کرده و متناسب با میزان اضافه‌بار، پس از گذشت مدت‌زمان خاص، ژنراتور را به طور کامل از مدار خارج کرده و همهٔ بارها را قطع می‌کنند. بر این‌اساس، استفاده از این رله‌های جریانی که ماهیت رفتاری شبیه حفاظت‌های بی‌متال دارند، دو چالش اساسی به دنبال خواهد داشت که عبارت‌اند از:

۱. میزان جریان نامی‌ای که بر اساس آن این رله‌ها تنظیم می‌شوند، متناسب با حداکثر ظرفیت ژنراتور در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، ظرفیت نامی ژنراتور به دلایل گوناگونی، همچون افزایش دمای محیط و یا اتصال بارهای غیرخطی کمتر از ظرفیت نامی مشخص‌شده روی پلاک ماشین خواهد بود. در نتیجه، رله‌های اضافه جریانی که تنظیمات آن‌ها برای ظرفیت نامی ژنراتور انجام شده است، نمی‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشند و عملکرد آن‌ها ممکن است باعث اضافه‌بار شدن ژنراتور شود.

۲. عملکرد رله‌های اضافه جریان مبتنی بر بی‌متال، معمولاً به گونه‌ای است که برای جلوگیری از تداوم بارگیری بیش از حد از ژنراتور، بریکر ژنراتور را باز کرده و بارهای متصل به آن را از مدار خارج می‌کند. حال آنکه، می‌توان با کنترل و مدیریت بارهای متصل روی ژنراتور و با خارج کردن فقط بخشی از فیدرهای خروجی آن، تداوم برق‌رسانی به سایر بارها را، با حفظ سلامت ژنراتور، تضمین کرد.

با توجه به موارد گفته‌شده، بخش حفاظت اضافه‌جریان طراحی‌شده در این مقاله، ضمن آنکه از منحنی‌های زمان ـ معکوس استاندارد، شبیه آنچه در [۲۲] ارائه شده است، برای حفاظت اضافه جریان استفاده می‌کند، میزان جریان نامی مورد استفاده در این منحنی‌ها، و به تعبیر دیگر تنظیمات سیستم حفاظت اضافه‌جریان، را درلحظه و متناسب با ظرفیت مجاز فعلی ژنراتور محاسبه و بر اساس آن عمل می‌کند. در نتیجه، واحد حفاظت جریانی این سیستم پایش، یک رله اضافه جریان تطبیقی است.

جدول ۲. میزان مجاز میزان هارمونیک‌های ولتاژ و جریان

استاندارد	THD (%)	هارمونیک‌های زوج			هارمونیک‌های فرد			نوع	
IEEE Std 1547	۵	ششم	چهارم	دوم	$17 \le h < 21$	$11 \le h < 17$	$3 \le h < 11$	هارمونیک (h)	جریان
		۱/٪۵	٪۲	٪۴	۱/٪۵	٪۲	٪۴	درصد	
IEEE Std 519	۸				٪۵			درصد	ولتاژ

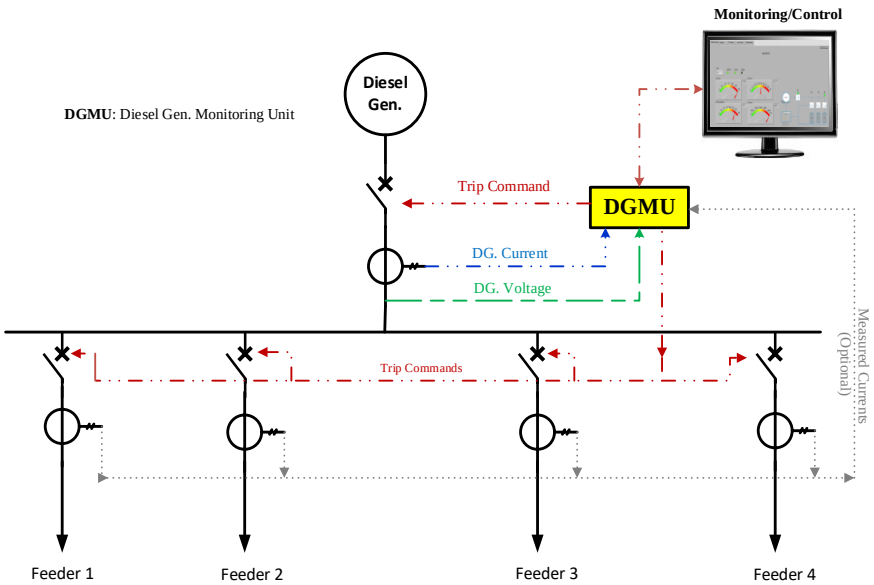
۲-۳. قیود هارمونیک‌های جریان و ولتاژ

اتصال دیزل ژنراتورها به شبکه‌های قدرت، همچون سایر تجهیزات برقی، مستلزم رعایت قیود و محدودیت‌های مربوط به هارمونیک‌های جریان و ولتاژ است. بر این‌اساس، در صورتی که میزان مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان ژنراتورها از حدود مشخص‌شده در استانداردها تجاوز کند، ممکن است امکان اتصال ژنراتور به شبکه و یا ادامهٔ کار پیوستهٔ آن در توان نامی میسر نباشد. برای مجهز کردن سیستم پایش پیشنهادی به الگوریتم پیاده‌سازی این محدودیت، ابتدا لازم است حدود مجاز هارمونیک‌های ولتاژ و جریان مشخص شود. با بررسی استانداردهای توصیف‌کنندهٔ محدودهٔ مجاز پارامترهای عملکردی دیزل ژنراتورها، به عنوان یکی از منابع پراکندهٔ موجود در سیستم قدرت، می‌توان محدودهٔ مجاز هارمونیک‌ها را در ولتاژ و جریان این تجهیزات مشخص کرد. بر این‌اساس، با توجه به استانداردهای ISO-8528، IEEE-519 و IEEE-1547 محدودیت‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان دیزل ژنراتورها به صورت اعداد نشان‌داده‌شده در جدول ۲ استخراج و در نرم‌افزار پایش وضعیت اعمال شد. بدیهی است که در کاربردهای مختلف می‌توان متناسب با نیاز بارهای متصل به ژنراتور و نیز بر اساس نوع استاندارد قابل

استفاده در هر محیط صنعتی، محدودهٔ هارمونیک‌های تعریف‌شده در جدول ۲ را تغییر داد. در الگوریتم پیاده‌سازی‌شده در سیستم پایش دیزل پیشنهادی، با انجام مداوم محاسبات سری فوریه، میزان مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان و نیز میزان THDهای ولتاژ و جریان محاسبه شده و در صورت خروج آن‌ها از حد مجاز، با استفاده از روال توصیف‌شده در بخش ۴، ابتدا سعی می‌شود که میزان هارمونیک‌ها را با مدیریت بارهای متصل به دیزل کاهش داد و در صورت عدم امکان کاهش هارمونیک‌ها، دیزل ژنراتور خاموش خواهد شد. از سوی دیگر، همان‌گونه که پیش از این بیان شد، ظرفیت نامی دیزل ژنراتورها برای کار در شرایطی تعریف می‌شود که بارهای متصل به آن خطی بوده و جریان و ولتاژ فاقد مؤلفه‌های هارمونیکی باشند. این در حالی است که عامل ایجاد هارمونیک‌های جریان، وجود بارهای غیرخطی است که درایوها و انواع مبدل‌های الکترونیک قدرت از این نوع هستند. با توجه به استفاده از دیزل ژنراتورها در محیط‌های صنعتی که مملو از این عناصر است، می‌توان انتظار داشته که جریان دیزل ژنراتور از حالت سینوسی خارج شده و هارمونیک‌های مختلفی در آن دیده شوند. از سوی دیگر، این هارمونیک‌های جریان به همراه هارمونیک‌های فضایی، که مفهوم آن‌ها در پژوهش ارائه‌شده در [۲۳] توضیح داده شده است، عامل ایجاد ولتاژهای غیر سینوسی در خروجی ژنراتور خواهند بود. به همین‌سبب، نمی‌توان انتظار داشت که دیزل ژنراتور بتواند با وجود این مؤلفه‌های هارمونیکی در ظرفیت نامی خود کار کند.

۳. ساختار کلی سیستم پیشنهادی برای پایش وضعیت دیزل

ساختار کلی سیستم پایش ارائه‌شده در این مقاله و نحوهٔ اتصال آن به تجهیزات اندازه‌گیری دیزل ژنراتور در شکل ۱ نشان داده شده است. نرم‌افزار مانیتورینگ و کنترل با اتصال به تجهیزات اندازه‌گیری، داده‌های اندازه‌گیری‌شده و نیز وضعیت اتصال بارها را دریافت می‌کند و به صورت هم‌زمان در صفحات HMI نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای اعمال فرمان‌های کنترلی تولیدشده در این سیستم، لازم است فیدرهای بارهای متصل‌شده به دیزل ژنراتور به بریکرهای با قابلیت فرمان خودکار مجهز شوند. همچنین، اگرچه الگوریتم پیشنهادی می‌تواند فقط بر اساس اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در پایانه‌های ژنراتور کار کند، ولی برای دقت بیشتر در صورت وجود ترانس جریان در فیدرهای خروجی، می‌توان جریان فیدرهای مختلف را هم تحلیل کرد و بر اساس آن در برخی از حالت‌ها که در بخش ۴ توضیح داده شده است، کارایی دقیق‌تری را از دستگاه دریافت کرد. بدیهی است دسترسی به جریان تک‌تک بارها می‌تواند به صورت گزینهٔ درخواستی در سیستم پایش پیشنهادی وجود داشته باشد و وجود آن‌ها الزامی نیست.



شکل ۱. نحوهٔ اتصال سیستم پایش پیشنهادی به دیزل ژنراتور و بریکرها

۴. محاسبهٔ میزان کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور

۴-۱. تأثیر شرایط نصب در کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور

تأثیر شرایط نصب در میزان ظرفیت نامی ژنراتورها موضوع شناخته‌شده‌ای است که عمدتاً به دلیل اثرگذاری شرایط محیطی بر پارامترهای مکانیکی دیزل‌ها اتفاق می‌افتد. عوامل متفاوتی وجود دارند که می‌توانند شرایط مکانیکی کار دیزل ژنراتور را تحت تأثیر قرار دهند و در نتیجه، باعث تغییر ظرفیت نامی دیزل ژنراتورها شوند. مهم‌ترین پارامترهایی که در این مورد نقش ایفا می‌کنند، دمای محیط، میزان رطوبت و نیز ارتفاع محل نصب دیزل از سطح دریاست. روش‌ها و منحنی‌های مختلفی از سوی کارخانه‌های سازنده برای محاسبهٔ میزان تأثیر این کمیت‌ها بر میزان کاهش ظرفیت دیزل ژنراتورها پیشنهاد شده است. در این مقاله، با توجه به روابط توصیف‌شده در [۲۴] و [۱۴] برای محاسبهٔ میزان کاهش ظرفیت نامی دیزل‌ها، از شرط‌های مناسب برای محاسبهٔ میزان کاهش ظرفیت نامی دیزل ژنراتور تحت کنترل توسط سیستم پیشنهادی استفاده می‌شود.

۴-۲. کاهش ظرفیت ناشی از هارمونیک‌ها

اگرچه در بخش ۴-۱ دلایل کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور از دید شرایط محیطی تأثیرگذار بر عملکرد مکانیکی دیزل ژنراتور مورد بررسی قرار گرفت، اما لازم است به این موضوع به طور ویژه دقت شود که عامل مهم دیگری که می‌تواند مانع از دستیابی به حداکثر توان نامی دیزل ژنراتور شود، ماهیت بار متصل به آن است. این مسئله موضوعی است که در بسیاری از سیستم‌های پایش وضعیت دیزل مورد توجه قرار نگرفته است. در حقیقت، همان‌گونه که پیش از این بیان شد، از دید استانداردهای کیفیت توان، یک دیزل ژنراتور در زمانی می‌تواند به شبکه متصل شود که هارمونیک‌های موجود در ولتاژ تولیدی آن و نیز THD ولتاژ خروجی کمتر از حد مجاز باشد. از سوی دیگر، عمده دلیل ایجاد هارمونیک‌های ولتاژ در حقیقت اتصال بارهای غیرخطی و جاری شدن مؤلفه‌های هارمونیکی جریان در سیم‌پیچ‌های ژنراتور است. بر همین‌اساس، در مراجع گوناگون، از جمله [۲۵]، بیان شده است که یکی از راه‌های کم کردن اثر هارمونیک‌های جریان روی هارمونیک‌های ولتاژ ژنراتورهای ایزوله، انتخاب ژنراتورهایی بیش از ظرفیت مورد نیاز بار غیرخطی و به تعبیر دیگر افزایش ظرفیت ژنراتور است. البته بدیهی است که انتخاب ژنراتور بزرگ‌تر برای تأمین توان یک بار غیرخطی مستلزم آن است که نخست میزان باز غیرخطی متصل به ژنراتور در هر لحظه مشخص باشد و دوم ظرفیت انتخاب‌شده در این حالت فقط برای اتصال به یک بار با رفتار هارمونیکی مشخص انجام گیرد. این در حالی است که در بسیاری از شبکه‌ها، نخست ممکن است میزان توان بارهای غیرخطی موجود در شبکه مشخص نباشد، دوم نسبت بارهای خطی و غیرخطی‌ای که در هر لحظه به ژنراتور متصل هستند ممکن است همواره ثابت نباشد (و در نتیجه رفتار هارمونیکی بارها هم تغییر کند) و سوم، میزان بارهای غیرخطی در هر لحظه ممکن است تغییر کند. به بیان دیگر، انتخاب ژنراتور با ظرفیت بزرگ‌تر فقط در زمانی راه‌حل مناسبی برای کم کردن هارمونیک‌های ولتاژ شناخته می‌شود که میزان بار از قبل کاملاً معلوم بوده و ماهیت آن هم تغییر نکند که این موضوع در بسیاری از شبکه‌های توزیع صنعتی محقق نمی‌شود.

با توجه به نکات یادشده و با توجه به تغییر مداوم در ماهیت و اندازهٔ بارهای متصل به ژنراتور، باید از این منظر این موضوع را بررسی کرد که برای حفظ هارمونیک‌های ولتاژ باید بارگیری از ژنراتور به طور مداوم پایش شده و به محض خروج مؤلفه‌های هارمونیک آن از حدود مجاز، میزان بار را به گونه‌ای کاهش داد که با کم شدن مؤلفه‌های هارمونیک جریان، مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ نیز کاهش یابند. بر این‌اساس، دستگاه پایش وضعیت دیزل ژنراتور ارائه‌شده در این مقاله از روال توضیح‌داده‌شده در این بخش استفاده می‌کند تا با مدیریت بار، به طور خودکار میزان هارمونیک‌های ولتاژ را در محدودهٔ مجاز نگه دارد.

رابطهٔ بین هر یک از مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان را می‌توان با استفاده از فرمول ۱ بیان کرد [۲۶].

$$V_n = I_n * n * X_d'' \qquad (۱)$$

که در آن، V_n هارمونیک nام ولتاژ، I_n هارمونیک nام جریان، n مرتبهٔ هارمونیک و X_d'' راکتانس زیرگذرای ژنراتور است. بر اساس رابطهٔ ۱ می‌توان گفت که در صورتی که مؤلفهٔ هارمونیک n-ام ولتاژ ژنراتور از حد مجاز تجاوز کند، لازم است عامل ایجاد آن یعنی مؤلفهٔ هارمونیک n-ام جریان به میزان مشخص‌شده در فرمول ۲ تغییر یابد تا این مؤلفهٔ هارمونیکی دوباره به محدودهٔ مجاز برگردد.

$$I_n^{'} = I_n - \frac{V_n - V_n^{'}}{n * X_d^{''}} \quad (۲)$$

در آن، $V_n^{'}$ و V_n به‌ترتیب درصد مجاز هارمونیک n–ام ولتاژ و درصد هارمونیک n–ام اندازه‌گیری شده و I_n و $I_n^{'}$ به‌ترتیب، هارمونیک n–ام جریان اندازه‌گیری شده و میزان جریان مورد نیاز برای رسیدن به مؤلفهٔ هارمونیکی ولتاژ مجاز هستند. همچنین، میزان کاهش جریان مورد نیاز برای رسیدن به مؤلفهٔ هارمونیکی ولتاژ مجاز در یک هارمونیک خاص را می‌توان با استفاده از فرمول ۳ نیز به دست آورد.

$$\Delta I = \frac{V_n - V_n^{'}}{n * X_d''} \quad (۳)$$

به‌علاوه، میزان جریان مجاز هارمونیک n–ام را می‌توان با توجه به هارمونیک‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده و نیز حد مجاز آن مؤلفه هارمونیکی ولتاژ، با استفاده از رابطهٔ ۴، به دست آورد.

$$I_n^{'} = I_n * \frac{V_n^{'}}{V_n} \quad (۴)$$

برای اعمال این کاهش جریان باید متناسب با بارهای متصل به ژنراتور و نیز متناسب با اطلاعاتی که از این بارها در اختیار سیستم پایش دیزل ژنراتور است، فرمان‌های کنترلی مناسب را به بریکرهای سیستم صادر کرد. بر این‌اساس، سناریوهای مختلف کاهش بار، متناسب با نوع بار متصل‌شده و میزان داده‌های در اختیار سیستم پایش و با توجه به شکل ۱، ممکن است به صورت یکی از حالت‌های زیر باشد:

حالت ۱. اگر ماهیت همهٔ بارهای متصل به فیدرهای خروجی ژنراتور مشابه (خطی یا غیرخطی با طیف هارمونیکی مشابه) باشد.

در صورتی که طیف هارمونیکی همهٔ بارهای متصل به فیدرهای خروجی ژنراتور مشابه باشد، مؤلفه‌های هارمونیکی محاسبه‌شده از جریان خروجی ژنراتور نزدیک به مؤلفه‌های هارمونیکی بارهای متصل به فیدرها است. بدیهی است که در این‌صورت با حذف برخی از بارها و کم شدن توان کل بار اعمالی بر ژنراتور، اندازهٔ مؤلفه‌های هارمونیکی نیز کاهش خواهند یافت. در این حالت می‌توان گفت که در صورتی که کل جریان خروجی ژنراتور با یک نسبت مشخص کاهش یابد، مؤلفه‌های هارمونیکی جریان آن نیز با همان نسبت کاهش می‌یابند. به عنوان مثال، می‌توان انتظار داشت که اندازهٔ هارمونیک سوم جریان یک بار با کاهش ۵۰درصدی توان آن بار، نصف شود. از سوی دیگر، همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، برای رسیدن به ولتاژ مجاز در یک هارمونیک خاص، لازم است جریان آن به میزان نسبت مشخص‌شده در رابطهٔ ۴ تغییر یابد. به بیان دیگر، میزان کاهش بار مورد نیاز برای اصلاح تجاوز هر هارمونیک ولتاژ از حد مجاز از رابطهٔ ۴ به دست می‌آید و سپس با اعمال فرمان به بریکرهای یک یا چند فیدر، این کاهش بار پیاده‌سازی می‌شود. درخور یادآوری است که در این حالت می‌توان در صورت لزوم، برای بارهای متصل به ژنراتور اولویت‌بندی تعریف کرد تا بر اساس آن اولویت‌بندی مشخص شود که کدام فیدر باید قطع شود.

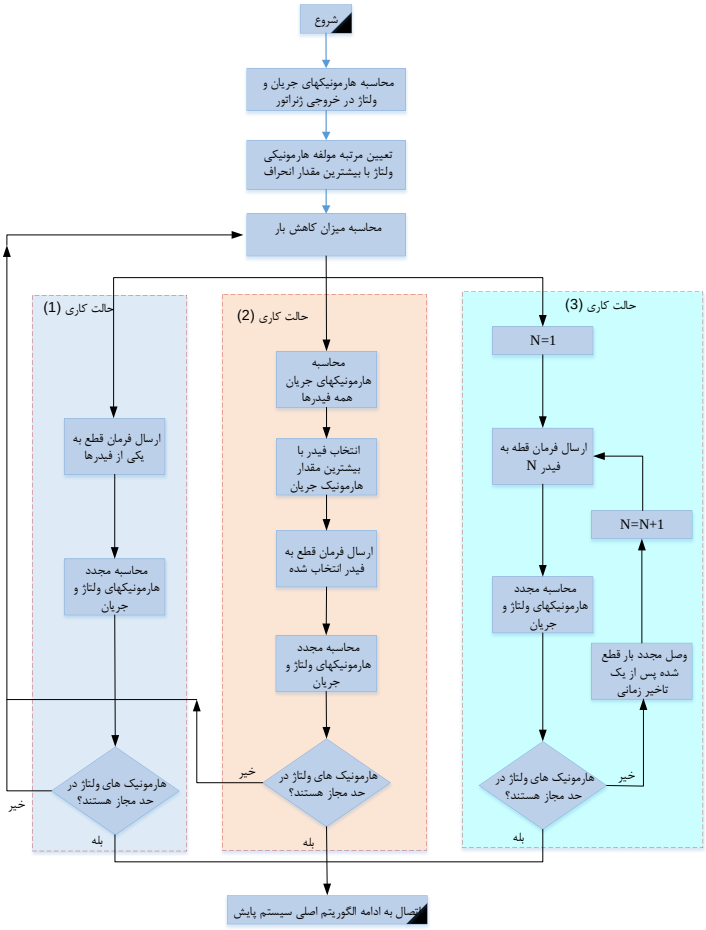
حالت ۲. ماهیت بارهای متصل به فیدرهای خروجی متفاوت است و جریان همهٔ فیدرها اندازه‌گیری شود.

در صورت مشابه نبودن بارهای متصل‌شده به فیدرهای مختلف، طیف هارمونیکی جریان اندازه‌گیری‌شده در نقطهٔ خروجی ژنراتور، رفتار همهٔ بارها را نمایندگی نمی‌کند. به بیان دیگر، نمی‌توان به‌صراحت بیان کرد که در این حالت با کاهش درصدی از بار، میزان مؤلفه‌های هارمونیک جریان خروجی ژنراتور نیز دقیقاً متناسب با همان درصد کاهش بار تغییر خواهد کرد. در این‌صورت، با توجه به در اختیار بودن جریان‌های همهٔ فیدرها و نیز مؤلفه‌های هارمونیکی آن‌ها، می‌توان پس از آنکه حدود میزان جریان را با استفاده از فرمول ۴ محاسبه کرد، کاهش بار را متناسب با هارمونیک‌های اندازه‌گیری‌شده در همهٔ فیدرها انجام داد. در این‌صورت، اگر بارها دارای اولویت خاصی نباشند، می‌توان با قطع کردن بار با بیشترین میزان هارمونیک‌های جریان اطمینان داشت که عدد هارمونیک کلی جریان، حتی بیش از مقدار محاسبه‌شده کاهش می‌یابد و در نتیجه، هارمونیک ولتاژ مربوط به آن مؤلفه بی‌شک در ناحیهٔ مجاز قرار خواهد گرفت.

حالت ۳. ماهیت بارهای متصل به فیدرها متفاوت است و فقط جریان خروجی دیزل ژنراتور اندازه‌گیری شده است (حالت کار عمومی).

این حالت کاری، حالت کار عمومی ژنراتورهاست که در بیشتر مواقع دیزل ژنراتور به این‌صورت مشغول به کار است. این حالت، از آن جهت شبیه حالت ۲ است که میزان کاهش بار کلی دیزل ژنراتور دقیقاً با میزان محاسبه‌شده در فرمول ۴ برابر نخواهد بود. اما تفاوت اساسی آن با حالت ۲ در آن است که فیدر با حداکثر میزان هارمونیک برای سیستم پایش شناخته‌شده نیست. در نتیجه، نمی‌توان مطمئن بود با قطع یک فیدر حتماً هارمونیک جریان مورد نظر کاهش می‌یابد. بر این‌اساس، در این حالت از یک پروسه سعی و خطا برای رسیدن به ولتاژ مجاز و حذف بار با حداکثر هارمونیک جریان استفاده خواهد شد. این پروسه که در شکل ۲ نشان داده شده، به این‌صورت است که پس از تعیین میزان کاهش بار، ابتدا فرمان قطع به یکی از فیدرها اعمال می‌شود. پس از قطع این بار، دوباره محاسبات هارمونیکی انجام شده و وضعیت هارمونیک ولتاژ مؤلفهٔ خواسته‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورت برگشتن این مؤلفه به حد مجاز، پروسهٔ حذف بار به اتمام می‌رسد، در غیر این‌صورت، این بار به مدار برمی‌گردد و پس از یک تأخیر زمانی، فیدر دیگر قطع و اثر آن روی تغییرات هارمونیک‌های ولتاژ بررسی می‌شود. این پروسه تا زمانی ادامه می‌یابد که با حذف یکی از فیدرها، هارمونیک‌های ولتاژ خروجی ژنراتور در محدودهٔ مجاز قرار گیرند.

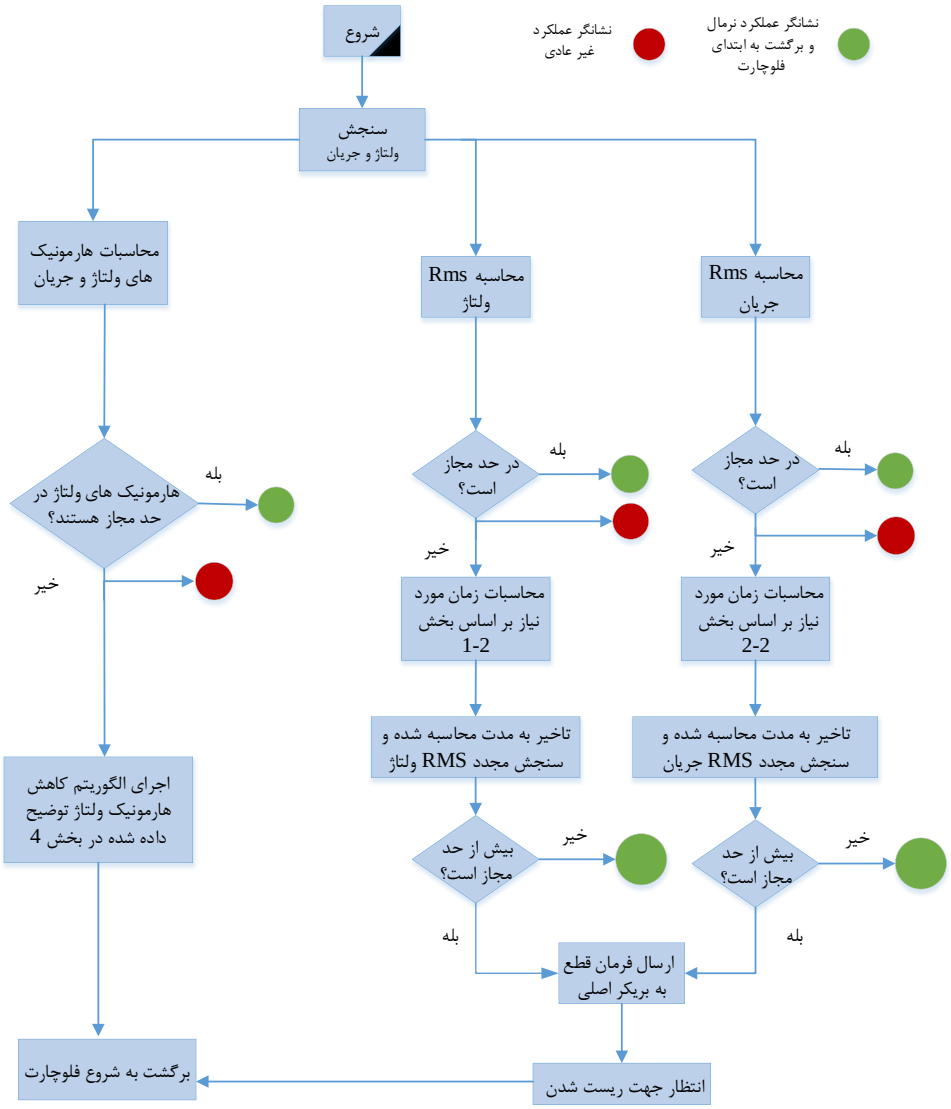
با توجه به حالت‌های سه‌گانهٔ یادشده، الگوریتم طراحی‌شده برای حذف بارها، پس از محاسبهٔ کاهش ظرفیت ناشی از اتصال بارهای غیرخطی به صورت نشان‌داده‌شده در شکل ۲ طراحی شده است. در انتهای الگوریتم میزان THD کل ولتاژ هم با مقادیر مرجع مقایسه می‌شود و در صورت قرار نداشتن آن در محدودهٔ مجاز، دوباره کاهش بار مورد نیاز برای کاهش بزرگ‌ترین مؤلفهٔ هارمونیکی ولتاژ محاسبه می‌شود. هرچند با توجه به اینکه در مراحل قبلی الگوریتم، هارمونیک‌ها به صورت انفرادی مورد بررسی قرار گرفته و اصلاح شده‌اند، می‌توان مطمئن بود که با این کار THD ولتاژ هم همواره در محدودهٔ مجاز قرار داشته باشد.



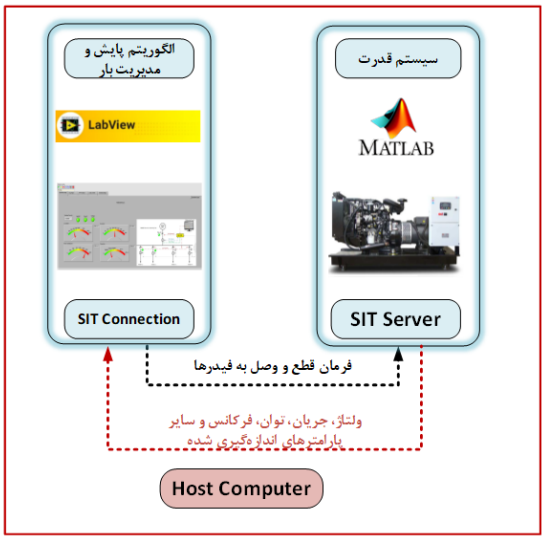
شکل ۲. فلوچارت کاهش بار برای کاهش مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ دیزل ژنراتور

۵. الگوریتم سیستم پایش وضعیت و مدیریت بار دیزل ژنراتور

شکل ۳ الگوریتم پیشنهادشده در این مقاله برای سیستم پایش وضعیت دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد. برای راحتی تشریح قابلیت‌ها، این الگوریتم به سه بخش تقسیم شده و به هر بخش شماره‌های ۱ تا ۳ اختصاص داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، در این الگوریتم جریان خروجی ژنراتور به صورت مداوم اندازه‌گیری شده و با مقدار مجاز سنجیده می‌شود. در صورت خروج جریان از حد مجاز، با توجه به توضیحات بخش ۲-۲، حداکثر زمانی که این اضافه‌بار قابل تحمل است محاسبه و پس از آن بر اساس تنظیمات ازپیش‌معین‌شده، فرمان قطع به یکی از بارها و یا مجموعه بارهای متصل به ژنراتور ارسال می‌شود. همین پایش و سنجش برای مشخص کردن اضافه ولتاژ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد و در صورت افزایش ولتاژ ترمینال خروجی ژنراتور از حد مجاز، با استفاده از توضیحات بیان‌شده در بخش ۳-۲، حداکثر زمان مجاز برای تحمل این اضافه‌ولتاژ محاسبه و در صورت کاهش نیافتن آن پس از تأخیر زمانی محاسبه‌شده، فرمان قطع به بریکر اصلی ژنراتور ارسال می‌شود. علاوه بر پایش مقادیر ولتاژ و جریان، هارمونیک‌های آن‌ها نیز بر اساس روال مشخص‌شده در شاخه‌های دیگر الگوریتم بررسی می‌شوند. در این ساختار، مدواما هارمونیک‌های ولتاژ نیز محاسبه شده و در صورت تجاوز هریک از هارمونیک‌ها، الگوریتم نشان‌داده‌شده در شکل ۲ اجرا می‌شود تا با کم کردن بار ژنراتور، ولتاژ به شرایط مجاز برگردد.



شکل ۳. الگوریتم پیشنهادی برای سیستم مدیریت بار دیزل ژنراتور



شکل ٤. ساختار ارتباط نرم‌افزاری برای تست الگوریتم پیشنهادی

۶. تست‌های نرم‌افزاری سیستم پایش و مدیریت پیشنهادی

۶–۱. روال انجام تست‌های شبیه‌سازی

یکی از موارد مهم در طراحی و ارائهٔ یک سیستم کنترل، انجام تست‌های نرم‌افزاری و ارزیابی عملکرد آن قبل از پیاده‌سازی سخت‌افزاری است. به این‌منظور، برای تست سیستم پایش پیشنهادی در این مقاله، از ایجاد ارتباط بین نرم‌افزارهای LabVIEW و MATLAB/Simulink و تشکیل یک پکیج نرم‌افزاری استفاده شده است. در حقیقت در این پکیج، با ترکیب Simulink و LabVIEW یک ساختار مناسب برای تست نرم‌افزاری سیستم‌های کنترل به صورت real-time فراهم می‌شود. در این ساختار، نرم‌افزار سیستم پایش، بر اساس الگوریتم ارائه‌شده در شکل ۳ در محیط LabVIEW پیاده‌سازی شده و به صورت هم‌زمان یک دیزل ژنراتور و بارهای آن، شبیه به مدار نشان‌داده‌شده در شکل ۱ در MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده است. داده‌های اندازه‌گیری‌شده در Simulink که شامل ولتاژها و جریان‌های دیزل ژنراتور شبیه‌سازی‌شده است، به LabVIEW منتقل شده و به الگوریتم پیشنهادی برای سیستم پایش تزریق می‌شوند. بدیهی است که این الگوریتم، در صورت عملکرد مناسب، می‌تواند مستقیم روی سخت‌افزار سیستم پایش بارگذاری شده و آمادهٔ انجام تست‌های واقعی و اتصال به دیزل ژنراتور شود. در حقیقت، مزیت مهم این روش تست نرم‌افزاری آن است که داده‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار پایش در محیط دیگری تولید شده و سپس به الگوریتم اصلی منتقل می‌شود و در حقیقت نرم‌افزار طراحی‌شده، در ساختاری شبیه به حالت عملی (اتصال به سخت‌افزار) تست می‌شود.

برای ایجاد ارتباط مناسب بین MATLAB و LabVIEW از تولکیت SIT[1] استفاده شده که ساختار کلی ایجاد این ارتباط در شکل ۴ نشان داده شده است. در حقیقت، SIT به عنوان یک واسطه بین این دو نرم‌افزار عمل کرده تا داده‌های مربوط به ولتاژ و جریان ژنراتور را که مورد نیاز سیستم پایش هستند از Simulink به LabVIEW و فرمان‌های کنترلی را از LabVIEW به Simulink منتقل کند [۲۷].

برای بررسی کارایی سیستم پایش پیشنهادی، نرم‌افزار این سیستم در قالب دو سناریو که هر یک زیربخش‌هایی دارند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. این سناریوها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که حالت‌هایی که ممکن است در عملکرد واقعی یک دیزل ژنراتور اتفاق بیفتد را پوشش دهند. سناریوی اول برای بررسی چگونگی عملکرد الگوریتم سیستم پایش پیشنهادی در حالت وقوع اضافه‌بار طراحی شده است. در قالب این سناریو نشان داده خواهد شد که به جای آنکه مبتنی بر اصول حفاظت اضافه‌بار مرسوم که پس از گذشت مدت زمانی از وقوع اضافه‌بار همهٔ بارها جدا می‌شوند، چگونه الگوریتم پیشنهادی با جلوگیری از قطع و

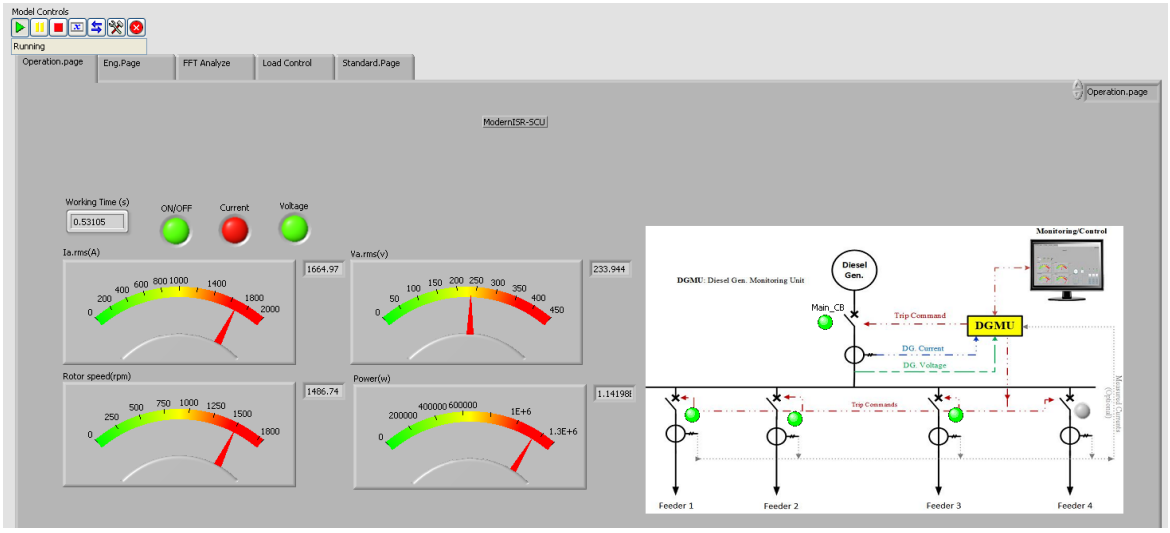
1. Simulation Interface Toolkit

جداسازی همهٔ بارها، فقط برخی فیدرهای با اولویت پایین‌تر را قطع می‌کند تا جریان کلی به حد مجاز برگردد و سایر بارها متصل بمانند. در این سناریو فقط مقادیر لحظه‌ای کمیت‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به دلیل خطی بودن بارهای متصل به ژنراتور، چالش‌های کیفیت توان ظهور نخواهند داشت. سناریوی دوم طراحی‌شده برای ارزیابی عملکرد سیستم پایش، به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در زمان اتصال بارهای غیرخطی به ژنراتور می‌پردازد. در این سناریو، نشان داده می‌شود که پس از اضافه شدن بارهای غیرخطی و تجاوز هارمونیک‌های جریان و ولتاژ ژنراتور از قیود استاندارد، چگونه سیستم پایش با اعمال فرمان‌هایی به منظور مدیریت و کاهش بارهای متصل‌شده، میزان هارمونیک‌ها را به زیر حد مجاز می‌رساند و برق‌رسانی مداوم به سایر بارها را تضمین می‌کند.

۶-۲. سناریوی اول: وقوع اضافه‌بار در شرایط اتصال بارهای خطی

در این سناریو، فرض می‌کنیم ابتدا ژنراتور در حالت کار عادی قرار دارد و با توجه به شرایط دمایی و چگونگی نصب آن می‌تواند تا جریان ۱۲۵۰ آمپر را تأمین کند. همچنین، فرض می‌شود که ۳ بار با توان‌های مختلف امکان اتصال به آن را دارند که بار ۳ نسبت به بار ۲ و بار ۲ نسبت به بار ۱ از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و اولویت اتصال بارها به ژنراتور بر اساس این میزان اهمیت مشخص می‌شود. ابتدا، بارهای ۱ و ۲ به ژنراتور متصل هستند و توانی حدود ۳۸۰ کیلووات به بارها اعمال شده است. در زمان ۰/۵ ثانیه بار شمارهٔ ۳ نیز به ژنراتور متصل شده و همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است جریان بار تا ۱۶۶۶ آمپر افزایش می‌یابد. این افزایش بار، اضافه‌جریانی بیش از ۳۳ درصد را روی دیزل ژنراتور تحمیل می‌کند. با توجه به معیارهای ارائه شده در [۲۱]، این اضافه‌بار تا ۱۰۰ ثانیه روی ژنراتور قابل اعمال است. اما فرض می‌کنیم که برای محافظت بیشتر از دیزل ژنراتور، تنظیمات سیستم کنترل به گونه‌ای انجام شده است که اضافه بار بیش از ۵ ثانیه را مجاز نمی‌داند و پس از آن کاهش بار و یا خاموشی ژنراتور را آغاز خواهد کرد.

با توجه به اولویت‌های بار، اولین گزینهٔ کاهش بار، باز کردن بریکر بار ۱ و خارج کردن آن از مدار است. با ارسال این فرمان، همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، جریان کاهش یافته و میزان RMS آن به حدود ۱۵۱۴ آمپر رسیده، اما در این حالت نیز همچنان دیزل تحت اضافه‌بار بوده و جریان خروجی آن ۲۱ درصد بیش از جریان مجاز ژنراتور است. در نتیجه، حلقه کاهش بار دوباره تکرار شده و بار ۲ که از اهمیت کمتری دارد در حدود زمان ۱۱ ثانیه از مدار خارج شده و همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، جریان دیزل را تا حدود ۱۱۴۲ آمپر کاهش می‌دهد. این جریان در محدودهٔ مجاز بوده و در نتیجه دیزل ژنراتور به طور ایمن به کار خود ادامه خواهد داد.



شکل ۵. تصویر صفحهٔ اپراتوری HMI پس از اضافه شدن بار ۳ در سناریوی ۱

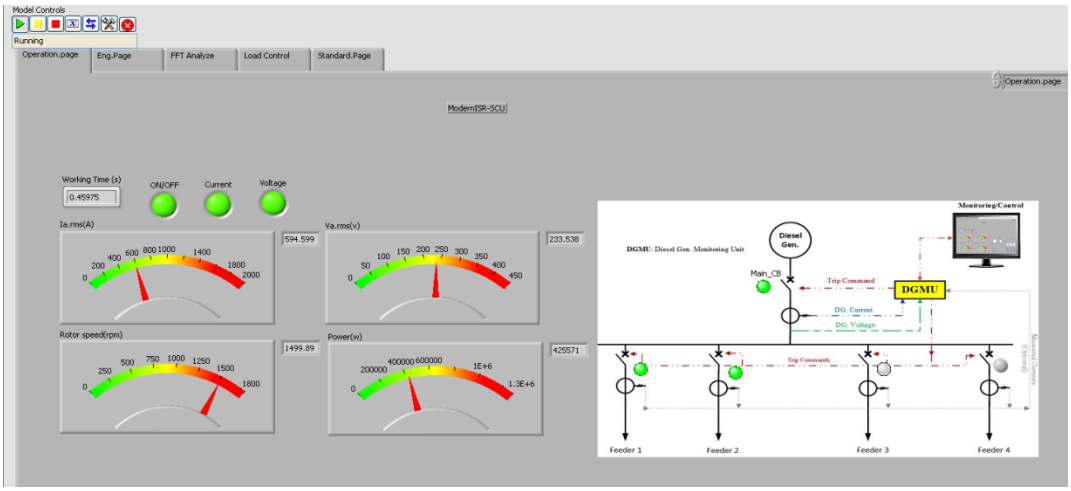
شکل ٦. شکل موج‌های ولتاژ و جریان و تغییرات توان ژنراتور در سناریوی ۱

۶-۳. سناریوی دوم: اتصال بارهای غیرخطی

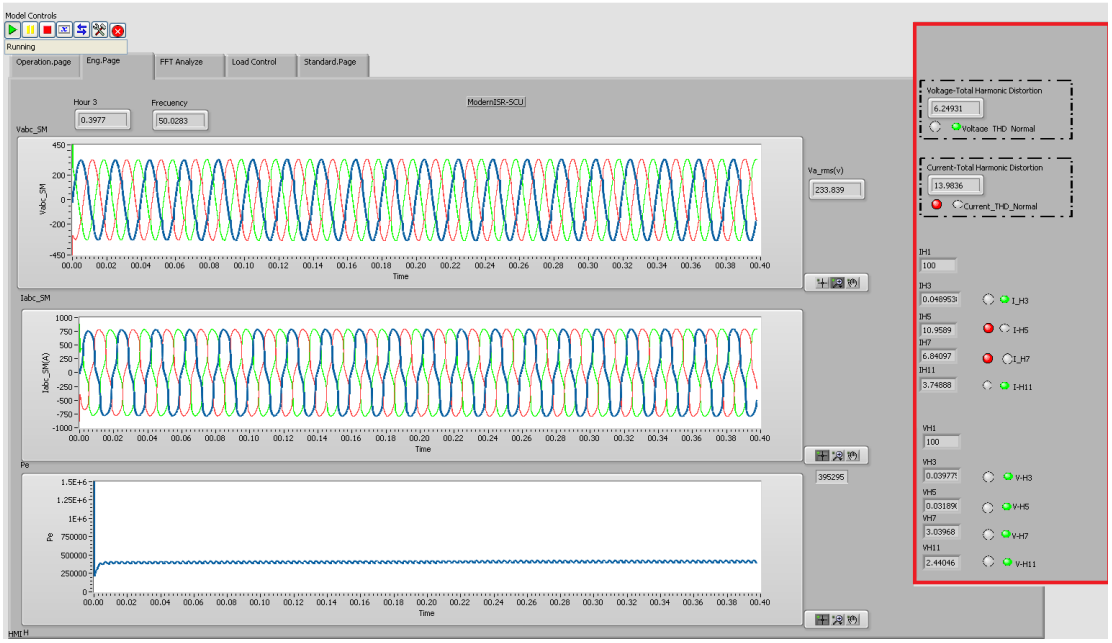
به منظور بررسی نحوهٔ عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ، در این سناریو اتصال بارهای غیرخطی به ژنراتور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ابتدای این سناریو، فرض می‌شود که به دلیل شرایط نصب و دمای محیط امکان بارگذاری تا جریان نامی (۱۵۰۰ آمپر) روی ژنراتور وجود دارد. همچنین، فرض می‌شود که اگرچه نوع و توان بارها با سناریوی قبل متفاوت است، اولویت‌های بارها به همان صورت گفته‌شده در قبل است. همچنین، بارهای ۲ و ۳ در این سناریو به صورت بارهای غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند که دارای یکسوکننده‌های الکترونیک قدرت هستند. شکل ۷ نمای صفحه اپراتوری سیستم پایش را در این حالت نشان می‌دهد. در ابتدای راه‌اندازی ژنراتور، بارهای ۱ و ۲ در مدار بوده و همان‌طور که از نشانگرهای شکل ۷ مشخص است، جریان خروجی دیزل ژنراتور در محدودهٔ مجاز بوده و ژنراتور به کار خود ادامه می‌دهد. نشانگرهای شکل ۷ همچنین مشخص می‌کنند که در ابتدای این سناریو، جریانی حدود ۶۰۰ آمپر در ولتاژ حدود ۲۳۳ ولت در خروجی ژنراتور جاری می‌شود. به‌علاوه، بر اساس وضعیت رنگ نمایشگرهای ایجادشده روی مدار تک‌خط سیستم تحت مطالعه، مشخص است که بریکرهای اصلی و نیز بریکرهای بارهای ۱ و ۲ وصل (به رنگ سبز) و بریکرهای سایر بارها قطع هستند. شکل ۸ بخشی از صفحهٔ تحلیل هارمونیکی HMI و نیز شکل موج‌های ولتاژ و جریان را از صفحهٔ مهندسی HMI نشان می‌دهد. در نمودارهای بالایی شکل ۸ که ولتاژهای سه‌فاز ژنراتور را نشان می‌دهد وجود هارمونیک‌ها و خروج شکل موج‌های ولتاژها از حالت سینوسی کاملاً قابل مشاهده است. همان‌گونه که در بخش سمت راست شکل ۸ مشخص است، به دلیل نوع بارهای متصل‌شده به ژنراتور، میزان THD جریان و ولتاژ مقادیری متفاوت با سناریوی ۱ پیدا کرده‌اند و در حالی که THD جریان تا بیش از ۱۳ درصد افزایش داشته و به دلیل تجاوز از حد استاندارد، نشانگر کنار آن قرمزرنگ شده، میزان THD ولتاژ حدود ۶.۲ درصد مانده و در حد مجاز تعریف‌شده برای این سیستم بوده و در نتیجه، نشانگر آن به رنگ سبز باقی مانده است. همچنین، نشانگرهای سمت راست شکل ۸ نشان می‌دهند همهٔ هارمونیک‌های ولتاژ در این حالت در محدودهٔ مجاز بوده و در نتیجه، نمایشگر آن‌ها با رنگ سبز روشن شده‌اند. همچنین، نشانگرهای هارمونیک‌های جریان، در سمت راست شکل ۸، نشان می‌دهند هارمونیک‌های پنجم و هفتم جریان ژنراتور نیز از حد مجاز خارج شده‌اند. از طرف دیگر، با وجود تجاوز هارمونیک‌های

جریان از حدود مجاز، و خارج شدن منحنی‌های جریان در بخش دوم شکل ۸ از حالت سینوسی خالص، جریان RMS کل ژنراتور همچنان در محدودهٔ مجاز آن بوده و به بیان دیگر، ژنراتور دچار اضافه‌بار نشده است. در نتیجه، سیستم کنترل می‌تواند اجازهٔ ادامهٔ کار را به ژنراتور بدهد و ادامهٔ این وضعیت کاری آسیبی به ژنراتور وارد نمی‌کند. منحنی آخر شکل ۸ توان خروجی دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد که طی مدت‌زمان نشان‌داده‌شده در این شکل دارای مقداری ثابت و با نوسانات بسیار محدود است.

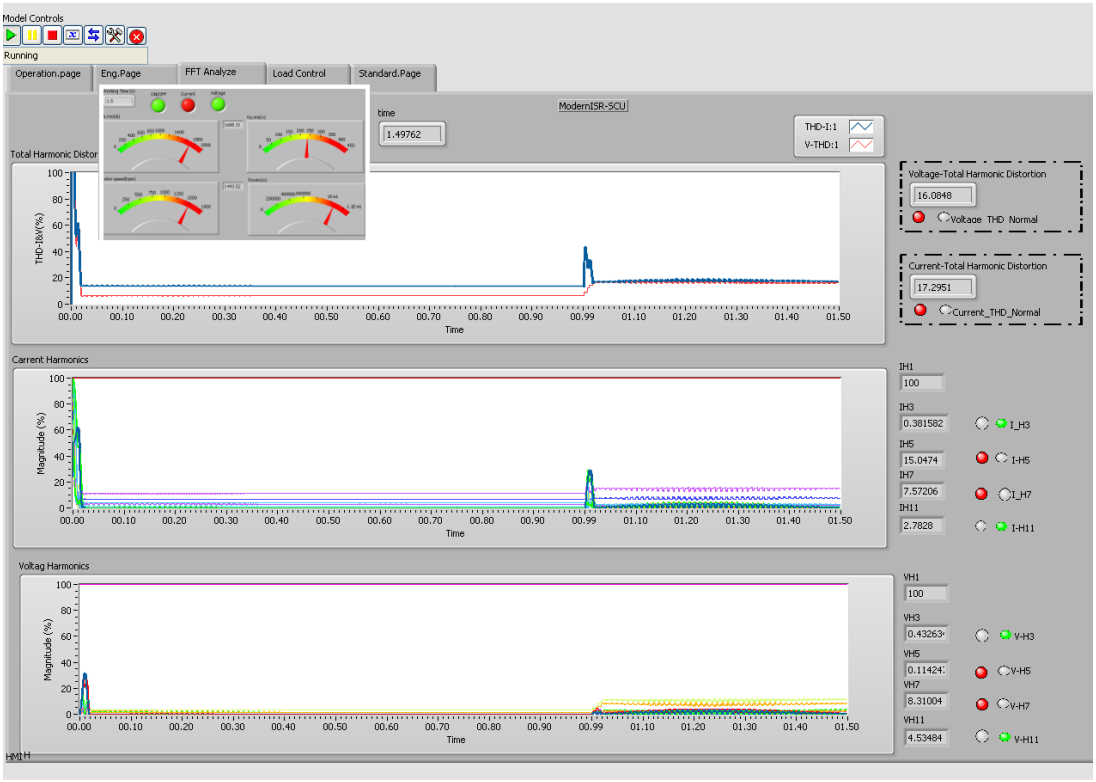
در ادامهٔ این سناریو فرض می‌شود که در شرایطی که با وجود این دو بار، ژنراتور در نزدیکی قیود عملیاتی هارمونیکی خود کار می‌کند، در لحظهٔ ۱ ثانیه بار ۳ متصل شده و همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، ژنراتور هم دچار اضافه‌بار شده و هم مؤلفه‌های هارمونیکی جریان و ولتاژ و THD آن‌ها از حد مجاز خارج می‌شود. در این حالت، میزان THD ولتاژ تا بیش از ۱۶ درصد افزایش می‌یابد و در نتیجه لازم است با کاهش بار اعمالی روی ژنراتور شرایط برای کار عادی سایر بارها فراهم شود. در نتیجه، با توجه به فرمول‌های بیان‌شده در بخش ۴-۲، میزان کاهش جریان مورد نیاز برای برگرداندن THD ولتاژ به حد مجاز محاسبه شده و با توجه به اولویت بارها، فرمان قطع به بار ۲ ارسال شده و این بار قطع می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، پس از اعمال این فرمان کنترلی، ژنراتور به حالت کار عادی برمی‌گردد و در نتیجه اثر بارهایی که باعث خارج شدن ولتاژ تولیدی ژنراتور از محدودهٔ مجاز بودند رفع می‌شود.



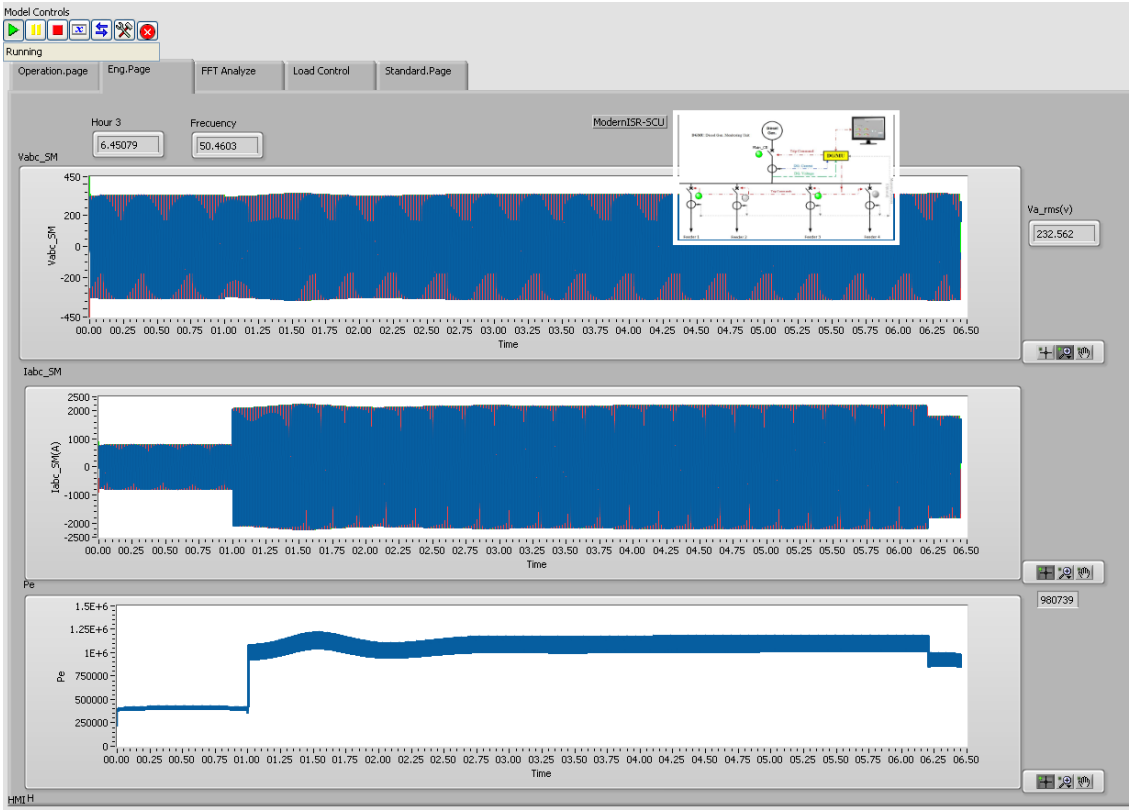
شکل ۷. تصویر صفحهٔ اپراتوری در ابتدای سناریوی ۲ و نشان دادن نرمال بودن وضعیت کاری



شکل ۸. شکل موج‌های جریان و ولتاژ و توان خروجی دیزل ژنراتور در ابتدای سناریوی ۲



شکل ۹. تصویر صفحهٔ آنالیز هارمونیکی HMI سیستم پایش دیزل در سناریوی ۲ پس از اتصال بار ۳



شکل ۱۰. شکل موج‌های ولتاژ و جریان و نیز تغییرات توان ژنراتور در سناریوی ۲

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم پایشی برای دیزل ژنراتورها ارائه و به صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی شده است که با پایش مداوم کمیت‌های الکتریکی ژنراتور در حوزهٔ زمان و فرکانس و نیز با محاسبهٔ کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور، ناشی از وجود بارهای غیرخطی، ضمن حفظ سلامت و عملکرد پایدار دیزل ژنراتور، از قطع همهٔ بارهای متصل‌شده پس از خروج پارامترهای عملکردی از قیود استاندارد جلوگیری کرده و به این‌وسیله حداقل بی‌برقی را برای بارها فراهم می‌کند. نتایج تست‌های انجام‌شده در ساختار ارتباطی بین Simulink و LabVIEW نشان‌دهندهٔ توانایی بالای روش پیشنهادی در حفظ شرایط کار استاندارد دیزل ژنراتور است. ضمن آنکه سیستم پایش پیشنهادی به گونه‌ای در LabVIEW پیاده‌سازی شده است که با اتصال به تجهیزات اندازه‌گیری موجود در دیزل ژنراتورها، می‌تواند به عنوان یک سیستم صنعتی دارای صفحات HMI مورد نیاز کاربران، مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به طور خلاصه، نتایج حاصل از سناریوهای ایجادشده برای ارزیابی این سیستم پایش را می‌توان در قالب‌های زیر خلاصه کرد:

الف) نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داد این روش قادر است آثار نامطلوب هر نوع بارگذاری‌ای که ژنراتور را از محدودهٔ کار مجاز خارج می‌کند را کنترل کند و در نتیجه بخش عمده‌ای از بارها را همواره به دیزل متصل نگه دارد. در این راستا، سناریوهای شبیه‌سازی‌شده نشان دادند در همهٔ موارد، بار با اولویت اول، یعنی مهم‌ترین بار متصل به دیزل، همواره برق‌دار باقی ماند. در نتیجه استفاده از این سیستم پایش، به‌خصوص در زمانی که از دیزل ژنراتورها برای تأمین برق اصلی بارهای حیاتی استفاده می‌شود بسیار مؤثر است. در حقیقت، این سیستم پایش با کم کردن میزان و زمان بی‌برقی بارها، به‌خصوص در زمانی که دیزل ژنراتور بارهای صنعتی را تغذیه می‌کند، می‌تواند از ضررهای مالی فراوانی که بر اثر جدا شدن همهٔ بارها ایجاد می‌شود جلوگیری کند.

ب) نتایج ارزیابی‌های انجام‌شده روی الگوریتم پیشنهادی نشان داده است که استفاده از این سیستم پایش تضمین می‌کند که حتی با وجود اتصال بارهای غیرخطی و جاری شدن جریان‌های هارمونیکی، همواره هارمونیک‌های ولتاژ و جریان دیزل ژنراتور در حدود مجاز باقی مانده و در نتیجه تنش‌های حرارتی، ناشی از افزایش دمای سیم‌پیچ و عایق، و نیز تنش‌های مکانیکی، ناشی از لرزش‌های گشتاور الکترومغناطیسی که با وجود هارمونیک‌های جریان مرتبط هستند، در ژنراتور باقی نمی‌ماند و در نتیجه کار پایدار آن را دچار اختلال نخواهد کرد.

ج) با توجه به یکپارچه کردن سیستم پایش دیزل ژنراتور و سیستم کنترل بریکرهای فیدرهای خروجی آن و نیز با توجه به امکان ایجاد ارتباط بین خروجی‌های این سیستم و رله‌های جریانی مربوط به فیدرها، این سیستم پایش یک سیستم حفاظت تطبیقی نیز فراهم کرده است که تنظیمات رله‌های جریانی را هم‌زمان با محاسبهٔ میزان کاهش ظرفیت دیزل ژنراتور و نیز پس از رفع این محدودیت تصحیح می‌کند.

منابع

[1] Narayanan, V. and B. Singh, Wind-driven position sensorless switched reluctance generator and diesel generator based microgrid for optimal fuel consumption and power blackout mitigation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023. 71(4): p. 3660-3672.

[2] Mohapatra, A.G., et al., An Industry 4.0 implementation of a condition monitoring system and IoT-enabled predictive maintenance scheme for diesel generators. Alexandria Engineering Journal, 2023. 76: p. 525-541.

[3] Park, M.-H., J.-J. Hur, and W-.J. Lee, Prediction of diesel generator performance and emissions using minimal sensor data and analysis of advanced machine learning techniques. Journal of Ocean Engineering and Science, 2025. 10(1): p. 150-168.

[4] Huang, A., et al., Decoupling identification method of continuous working conditions of diesel engines based on a graph self-attention network. IEEE Access, 2022. 10: p. 36649-36661.

[5] Asimakopoulos, I., et al., Data-driven condition monitoring of two-stroke marine diesel engine piston rings with machine learning. Ships and Offshore Structures, 2024. 19(9): p. 1241-1253.

[6] Liu, H., et al., An Optimized Vibration Signal Compressed Sensing Based on Phase Blocking K-SVD Algorithm for Marine Diesel Engine Cylinders. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025.

[7] Shahid, S.M., S. Ko, and S. Kwon, Real-time abnormality detection and classification in diesel engine operations with convolutional neural network. Expert Systems with Applications, 2022. 192: p. 116233.

[8] Lee, R.-M., et al., Design and Development of Condition Monitoring System for Wind Turbines Based on Generator Output Voltages. Sensors & Materials, 2020. 32.

[9] Mendonça, P., et al., Detection and modelling of incipient failures in internal combustion engine driven generators using electrical signature analysis. Electric Power Systems Research, 2017. 149: p. 30-45.

[10] Liu, W., et al., Power quality assessment in shipboard microgrids under unbalanced and harmonic AC bus voltage. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018. 55(1): p. 765-775.

[11] Rodriguez, J.A., F. Salcedo, and S.B. Bayne. Investigating the Effects of Non-Linear Loads on Generator Sets. in 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). 2021. IEEE.

[12] Bulatov, Y., A. Kryukov, and K. Suslov, Effect of unbalanced and non-linear loads on operation of the turbogenerator of a distributed generation unit. Applied Sciences, 2023. 13(6): p. 3643.

[13] Elsebaay, A., M. Adma, and M. Ramadan, Analyzing the effect of ambient temperature and loads power factor on electric generator power rating. World Acad. Sci., Eng. Technol. Int. J. Energy Power Eng, 2017. 11(2): p. 171-176.

[14] Kithsiri, U., et al., A model for estimation of de-rating in diesel engines used for power generation. International Journal of Energy Engineering, 2016. 6(2): p. 36-42.

[15] Hoevenaars, A.H., M. McGraw, and J. Alexander, Rightsizing Generators Through Harmonic Mitigation Realizes Energy, Emissions, and Infrastructure Reductions. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017. 53(1): p. 675-683.

[16] Kaur, K. Introduction to LabVIEW Programming and Its Advantages. Last updated: 02 January 2023.

[17] Glavan, B., et al., Condition-Monitoring System for Identification and Representation of the Capability Diagram Limits for Multiple Synchronous Generators in a Hydro Power-Plant. Energies, 2020. 13(15): p. 3800.

[18] Yu, T.-C., Y.-B. Lin, and F.-S. Chang, Establishment of the photovoltaic simulation system using mixed programming with LabVIEW and simulink, in Intelligent Technologies and Engineering Systems. 2013, Springer. p. 383-394.

[19] Casado, A.J., et al., A monitoring system for diesel engine driven generators based on electric power output oscillation assessment. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016. 53(3): p. 3182-3188.

[20] Han, Z., et al. Health Condition Identification and Quantitative Assessment of Emergency Diesel Generator Sets Based on Back Propagation Neural Network and Mahalanobis Distance. in Journal of Physics: Conference Series. 2023. IOP Publishing.

[21] Photovoltaics, D.G. and E. Storage, IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. IEEE Std, 2018: p. 1547-2018.
[22] AGN 035 – Overload and Fault Protection, Cummins, Editor.
[23] Hemmatipoor, G., et al. Modeling Small Diesel Generator Connected to Non Linear Loads Base on Space and Time Harmonics. in 2011 International Conference on Future Computer Sciences and Application. 2011.
[24] Mahon, L., Diesel generator handbook. (No Title), 1992.
[25] Thakur, A., Managing Emergency Generators With Nonlinear Loads, in Technical report. 2017, KOHLERPOWER.
[26] Harmonic Voltage Distortion. Cummins Generator Technologies, in AGN 026 Application Guidance Notes: Technical Information from Cummins Generator Technologies.
[27] Parizad, A., et al., Real-time simulator and offline/online closed-loop test bed for power system modeling and development. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020. 122: p. 106203.