



کاویرتایر

اولین تولیدکننده تایر در ایران

سنسور کنترل بار دینامیک با ضریب سکتۀ انرژی ESI

مهدی شفیع^{۱*}، پیمان نجاری^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق قدرت، بیرجند ۲- دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، بیرجند

*Mahdi_shafeie@yahoo.com (۰۹۱۵۱۶۳۰۸۰۴)

چکیده:

در صنایع حساس و پیوسته محور نظیر صنایع لاستیک، بروز نوسانات شدید و ناگهانی در توان ورودی می‌تواند به‌عنوان یکی از عوامل پنهان ولی خطرناک در خرابی تجهیزات شناخته شود. این نوسانات معمولاً در بازه‌های زمانی کوتاه (در حد چند میلی‌ثانیه) رخ داده و از دید ابزارهای پایش مرسوم مانند رله‌های حفاظتی یا آنالایزهای توان مخفی می‌مانند. در این مقاله، یک سنسور هوشمند مبتنی بر شاخص نوآورانه‌ای با عنوان ضریب سکتۀ انرژی (ESI^۱) معرفی شده است. این سنسور با بهره‌گیری از پردازش سریع و نرخ نمونه‌برداری بالا، قابلیت شناسایی و تحلیل نوسانات بسیار تیز در پروفایل توان مصرفی را دارد. ایده محوری این فناوری بر پایه شناسایی سریع نرخ تغییرات توان و مقایسه آن با آستانه‌های تعریف‌شده بنا نهاده شده است. در صورت عبور این شاخص از حد مجاز، سیستم به‌طور هوشمندانه می‌تواند هشدار صادر کرده یا اقدام حفاظتی فوری نظیر قطع تجهیز، انتقال بار یا فعال‌سازی مسیر Bypass انجام دهد. نتایج شبیه‌سازی و مطالعه گزارشات این سنسور در یکی از خطوط UPS کارخانه تاپرسازی، کاهش قابل‌توجه خطاهای ناشی از سکتۀهای انرژی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد.

این مقاله ضمن تشریح مفهوم ESI، معماری سخت‌افزاری و الگوریتمی سنسور را معرفی کرده و کاربردهای آن را در بخش‌های مختلف صنعت لاستیک (از پرس‌های حرارتی تا UPS و کنترلرهای PLC) بررسی می‌نماید. نتایج حاصل، گویای آن است که به‌کارگیری چنین سامانه‌ای می‌تواند نقش کلیدی در کاهش توقفات تولید، افزایش عمر مفید تجهیزات و افزایش بهره‌وری ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: سکتۀ انرژی، تشخیص نوسانات لحظه‌ای توان، پایش کیفیت توان، حفاظت پیشگیرانه، پیک لحظه‌ای انرژی.

۱- مقدمه

صنایع حساس و پیوسته‌محور نظیر صنعت لاستیک، متکی بر عملکرد بدون وقفه تجهیزات الکترونیکی دقیق و سیستم‌های اتوماسیون می‌باشند. بروز کوچک‌ترین اختلال در توان تغذیه این تجهیزات، به‌ویژه اگر با نوسانات ناگهانی و شدید همراه باشد، می‌تواند منجر به توقف خطوط تولید، سوختن تجهیزات گران‌قیمت یا حتی خرابی‌های زنجیره‌ای شود [۱]. برخلاف نوسانات فرکانسی یا ولتاژی متداول که در بازه‌های زمانی بلندتری رخ می‌دهند، نوع خاصی از نوسانات به نام سکتۀهای انرژی وجود دارد که در کمتر از چند میلی‌ثانیه شکل می‌گیرد و به همان سرعت نیز از بین می‌رود. این نوع از اغتشاش‌ها معمولاً ناشی از قطع و وصل ناگهانی بارهای بزرگ، خطاهای زمین لحظه‌ای، تشکیل آرک‌های الکتریکی در تابلوهای فشار ضعیف و اتصال سریع مجدد UPS یا ژنراتورها می‌باشند. چالش اساسی این است که بیشتر سیستم‌های حفاظتی مرسوم مانند رله‌های حفاظتی، آنالایزهای شبکه برق و رکوردرهای استاندارد داده، در برابر این نوع پیک‌های بسیار کوتاه‌مدت ناتوان یا بسیار کند هستند [۲]. زیرا زمان نمونه‌برداری یا تحلیل آن‌ها متناسب با تغییرات میلی‌ثانیه‌ای نیست. لذا به منظور مقابله با این چالش، طراحی یک حسگر سریع، هوشمند و تخصصی که قابلیت محاسبه شاخص ضریب سکتۀ انرژی را دارد، مورد نیاز است.

هدف این مقاله معرفی ساختار مفهومی و اجرایی این سنسور پایش و شناسایی سکتۀهای انرژی در زمان واقعی بوده و برای محیط‌های صنعتی طراحی شده است. در این مقاله، ساختار داخلی، الگوریتم تصمیم‌گیری، و نتایج استفاده از این سنسور در کارخانه تولید تایر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش‌های بعدی، عملکرد این سنسور در پیشگیری از خرابی‌های غیرمنتظره و بهره‌وری تجهیزات نشان داده شده است.

۲- تعریف ضریب سکتۀ انرژی

در شکل ۱، پروفایل ولتاژ خط در یک کارخانه صنعتی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک لحظه کوتاه، پیک تیزی از ولتاژ به‌صورت ناگهانی ظاهر شده و در کمتر از ۵ میلی‌ثانیه محو می‌شود. این پدیده که معمولاً توسط ابزارهای معمول قابل تشخیص نیست، می‌تواند به مدارهای ورودی UPS، منابع تغذیه حساس یا ورودی اینورترها آسیب بزند. سنسور ESI دقیقاً با هدف شناسایی این نوع پیک‌ها طراحی شده است.

۱-۲- تعریف مفهومی و کارکرد ESI

ضریب سکتۀ انرژی، شاخصی است که تغییرات توان ورودی را در بازه زمانی بسیار کوتاه، تحلیل کرده و عددی تولید می‌کند که شدت حمله لحظه‌ای انرژی را مشخص می‌سازد. مقدار این شاخص نه به مقدار توان مطلق، بلکه به نرخ تغییر (slope) توان وابسته است. به بیان ساده‌تر ESI می‌گوید توان با چه سرعتی در حال افزایش یا کاهش است، نه اینکه چقدر زیاد یا کم است. این رویکرد کاملاً منطبق با واقعیت‌های دینامیک تجهیزات صنعتی است؛ زیرا یک تغییر آهسته در توان حتی تا چند کیلووات خطرناک نیست، اما یک تغییر شدید در حد چند ده میلی‌ثانیه حتی با توان کوچکی می‌تواند باعث خطای داخلی یا آسیب شود. تجهیزات معمول پایش انرژی نظیر رله‌های حفاظتی، آنالایزهای توان، یا سیستم‌های اسکادا، به‌طور عمده روی خطاهای پایدار یا نیمه‌پایدار تمرکز دارند؛ اما در برابر نوسانات تیز و لحظه‌ای (که در کمتر از چند میلی‌ثانیه رخ می‌دهند) واکنشی نشان نمی‌دهند. **ESI: Power Spike Detector** می‌کند. از این‌رو نیاز به شاخصی مستقل، عددی، قابل سنجش و واکنش‌پذیر برای شناسایی سکتۀهای انرژی (ESI) که همان افزایش ناگهانی نرخ توان در بازه‌های کوتاه هستند، احساس می‌شود.

۲-۲- فرمول اصلی ضریب سکتۀ انرژی

در رابطه ۱، ESI(t) مقدار شاخص در لحظه t، P(t) توان لحظه‌ای ورودی تجهیز، P_{nominal} توان نامی تجهیز (مبنای نرمال‌سازی، $\frac{dP(t)}{dt}$ (مشق توان نسبت به زمان) است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این شاخص، بدون بعد رابطه ۱) $ESI(t) = \frac{1}{P_{nominal}} \cdot \frac{dP(t)}{dt}$ بودن آن، مستقل بودن از ابعاد فیزیکی سیستم، حساسیت بالا به نوسانات سریع و قابل کالیبره بودن برای هر تجهیز بسته به ویژگی آن می‌باشد [۳ و ۴].

۲-۳- مثال کاربردی برای درک بهتر

فرض کنید یک موتور صنعتی ۵ کیلووات در حال کار عادی است. به دلایل خاصی (مثلاً اتصال مجدد یک پمپ یا فشردن همزمان چند کلد صنعتی)، طی کمتر از ۳ میلی‌ثانیه، توان ورودی آن از ۱ کیلووات به ۵ کیلووات می‌رسد. این جهش شدید، اگرچه فقط چند میلی‌ثانیه طول می‌کشد، اما می‌تواند منجر به خرابی درایو IGBT به علت نرخ افزایش جریان، UPS وارد مد bypass و ناپایداری ولتاژ باس مشترک و در نتیجه توقف خط تولید شود. در چنین حالتی، مقدار ESI افزایش ناگهانی را نشان می‌دهد و می‌تواند با اعمال سیگنال هشدار، سیستم را نجات دهد.

۲-۴- محدوده‌های عملکرد و تصمیم‌گیری و رفتار سیستم در دو حالت نرمال و سکتۀای

عملکرد پیشنهادی	تفسیر	مقدار ESI
ادامه کار عادی	نوسانات نرمال	ESI < ۰.۵
ثبت رخداد + مانیتورینگ دقیق	سطح هشدار	۰.۵ < ESI < ۱.۵
فعال‌سازی خروجی هشدار، قطع اضطراری یا انتقال بار	وضعیت بحرانی	ESI ≥ ۱.۵

جدول ۱- محدوده‌های عملکرد و تصمیم‌گیری

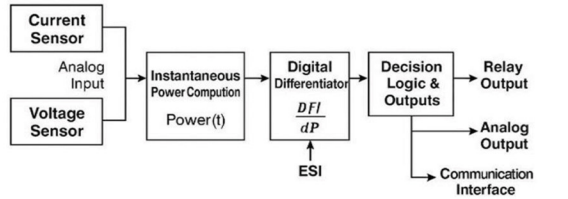
آستانه‌ها بسته به نوع تجهیز قابل تنظیم هستند. به‌علاوه، در نسخه‌های پیشرفته‌تر، می‌توان این آستانه‌ها را به‌صورت تطبیقی (adaptive) با الگوریتم‌های هوش مصنوعی تنظیم کرد. در نمودار شکل ۲ منحنی A نشان‌دهنده وضعیت عادی است که شامل نوسانات سینوسی یا بارگذاری تدریجی سیستم می‌باشد. در این حالت، مقدار مشق زمانی کم است و ESI پایین باقی می‌ماند. منحنی B یک نمونه از سکتۀ انرژی را نمایش می‌دهد. در لحظه‌ای خاص، توان ورودی جهش بسیار شدیدی پیدا کرده و بلافاصله افت می‌کند. این افزایش و کاهش ناگهانی موجب می‌شود مشق زمانی توان بسیار زیاد شود و مقدار ESI از حد آستانه عبور کند. نتیجه این افزایش ESI می‌تواند باعث فعال‌سازی خروجی هشدار، فرمان قطع تجهیز، ارسال پیام به سیستم مانیتورینگ و جلوگیری از آسیب به تجهیزات حیاتی باشد.

۳- معماری سنسور هوشمند ESI و اجزای طراحی آن

۳-۱- مقدمه و ضرورت طراحی سخت‌افزار ویژه

تشخیص سکتۀهای انرژی با دقت میلی‌ثانیه‌ای، نیازمند سیستمی با نرخ نمونه‌برداری بسیار بالا، پردازش سریع و الگوریتم تحلیل بی‌وقفه است. این وظایف نه توسط رله‌های مکانیکی، نه آنالایزهای کند و نه سیستم‌های اسکادا سنتی قابل انجام نیستند. از این رو، سنسور ESI به‌عنوان یک ابزار ترکیبی سخت‌افزاری _ نرم‌افزاری طراحی می‌شود که سه ویژگی کلیدی اندازه‌گیری سریع و دقیق توان لحظه‌ای، تحلیل عددی مشق توان در لحظه و تصمیم‌گیری هوشمند بر اساس آستانه‌های تعریف‌شده یا تطبیقی را دارد [۵].

۳-۲- بلوک دیاگرام سیستم



شکل ۳- اجزای اصلی سنسور ESI

اجزای اصلی سنسور مطابق با شکل ۳ شامل: الف) ماژول اندازه‌گیری ولتاژ و جریان^۱ (سنسورهای اثر هال CT/PT با دقتی با خروجی آنالوگ برای ولتاژ و جریان و باید دارای نویز پایین و پاسخ سریع باشد)، ب) ماژول محاسبه توان لحظه‌ای^۲ (توان لحظه‌ای با استفاده از رابطه $P(t) = V(t) \cdot I(t)$ در هر نمونه زمانی محاسبه می‌شود که پردازنده باستانی حداقل با نرخ ۲۰ kHz پردازش کند) ج) ماژول مشتق‌گیر عددی^۳ (با استفاده از الگوریتم مشتق‌گیری گسسته مانند $\frac{dP(t)}{dt} \approx \frac{P(t) - P(t-\Delta t)}{\Delta t}$ که این بخش حساس‌ترین بخش سیستم است و باید نویز را فیلتر کرده و تغییرات واقعی را استخراج کند)، د) ماژول محاسبه و پورت ارتباطی مشابه RS485/Modbus برای ارسال هشدار به سیستم مانیتورینگ فعال می‌شوند.

۳-۳- ساختار نرم‌افزاری پیشنهادی

برنامه درون میکروکنترلر یا FPGA، شامل چهار سطح پردازش است: الف) نمونه‌برداری سریع از سیگنال‌ها^۲ (ب) محاسبه توان و مشق^۳ ج) استخراج مقدار ESI و مقایسه با آستانه^۴ و د) ارسال فرمان داده به بیرون^۵. به‌عنوان مثال در کارخانه تایر معرفی شده در [۱]، سنسور ESI در ورودی UPS صنعتی ۱۰ kVA نصب شده و نتایج حاصل منجر به شناسایی بیش از ۲۱ سکتۀ انرژی در یک هفته کاری، جلوگیری از ۳ مورد خطای UPS که پیش از نصب منجر به توقف خط تولید می‌شد و امکان ارسال هشدار به اپراتور از طریق نمایشگر مرکزی مهیا شده است.

۴- کاربرد سنسور ESI در صنعت لاستیک و تحلیل میدانی

صنایع لاستیک، به‌ویژه کارخانجات تاپرسازی، از جمله صنایع انرژی‌بر و حساس به کیفیت انرژی الکتریکی است. در بخش‌های مختلف این صنعت، تجهیزات بخش‌های اختلاط (موتورهای سنگین و اینورترها با حساسیت بسیار بالا)، کلندرینگ (دراپوها و HMI با حساسیت بالا)، خطوط پخت (کنترلر حرارتی و UPS با حساسیت بسیار بالا) و مرکز آزمون (PLC)ها و سنسورها با حساسیت متوسط به بالا) از نظر الکتریکی بسیار حساس هستند. در گزارش‌های فنی، چند پدیده الکتریکی رایج که به صورت سکتۀ انرژی کوتاه‌مدت روی داده‌اند، اثر نوسانات ناآنی از قطع و وصل ناگهانی بارهای سلفی، اتصال کوتاه در تابلوهای فشار ضعیف، ورود یا خروج یک UPS یا ژنراتور به مدار و خطای زمین لحظه‌ای در تابلو کنترل باس مشترک بوده است.

۴-۱- مطالعات استفاده از سنسور ESI در UPS‌های صنعتی

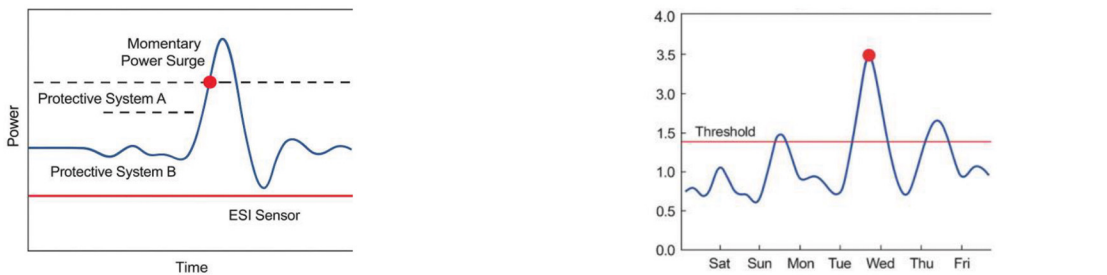
در پروژه عملیاتی [۲]، سنسور ESI در کارخانه تایر در بخش کنترل کیفی بر روی UPS نصب شد. نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

بعد از نصب ESI	قبل از نصب ESI	شاخص عملکرد
صفر	۴ مورد در ماه	خاموشی ناگهانی UPS
۱ بار (تست‌شده) یا ۳ بار (هشدار)	خطای PLC ناشی از	خاموشی ناگهانی UPS
۲۷ مورد در ۲ روز	نامشخص	سکتۀ انرژی ثبت‌شده
بررسی و تنظیم بار	نداشت	واکنش اپراتور به هشدار
لحظه‌ای	بهبود مانیتورینگ	هوشمند

جدول ۳- نتایج نصب سنسور ESI در بخش کنترل کیفی کارخانه تایر

۴-۲- نمودار عملکردی ESI در این تست

نمودار شکل ۴، محور افقی روزهای هفته را نشان می‌دهد. محور عمودی مقدار شاخص ESI را با مقیاس بدون بعد از ۰ تا ۴ نشان می‌دهد. خط قرمز مقدار آستانه هشدار^۴ را روی ESI=1.5 مشخص کرده است. نقاط قرمز روی نمودار، رخدادهایی هستند که مقدار ESI از حد مجاز عبور کرده و سنسور وارد حالت هشدار یا حفاظت شده است. این نمودار به تیم نگهداری کمک می‌کند الگوهای بروز سکتۀ انرژی را شناسایی کرده و زمان‌بندی روشن شدن تجهیزات را بهینه کنند. همچنین، تعداد دفعات عبور از آستانه در هر روز می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای بهبود طراحی سیستم تغذیه یا مدیریت بار باشد.



شکل ۵- Conceptual Response of Three Protective Systems to Momentary Power Surge

ترکیب سخت‌افزار سریع و الگوریتم تحلیلی مبتنی بر ESI، راهکاری قابل پیاده‌سازی در محیط‌های صنعتی واقعی است. در صنایع لاستیک، این راهکار نه‌تنها قابل اجراست بلکه می‌تواند به عنوان یک ماژول استاندارد حفاظتی برای UPS، PLC، HMI و دراپوها تعریف شود. در کارخانه‌هایی که پایداری تولید یک الزام است، ESI می‌تواند موثر واقع گردد.

نمودار شکل ۵، برای یک پیک لحظه‌ای فرضی با عرض پالس ۵ms، رله حفاظتی کاملاً پیک را از دست می‌دهد، آنالایز فقط پس از وقوع پیک آن را ثبت می‌کند ولی سنسور ESI همان لحظه هشدار و یا فرمان قطع را صادر می‌کند. در این نمودار خط آبی، تغییرات توان را در طول زمان نشان می‌دهد که شامل یک افزایش ناگهانی است. سه خط افقی یا سطوح واکنش نشان‌دهنده زمان پاسخ سه سیستم مختلف هستند که Protective System A کندترین

17 Conference And 9 Exhibition Rubber And Related Industries

Iranmall January 6-7 2026

ایران مال ۱۸ تا ۲۱ دی ماه ۱۴۰۴

Processing Layer Decision Logic & Outputs Sampling Layer Communication Layer Threshold Decision Layer

واکنش (عملاً پیک را از دست می‌دهد)، Protective System سریع‌تر از A ولی هنوز با تأخیر نسبت به پیک واقعی واکنش نشان می‌دهد. ESI Sensor سریع‌ترین واکنش را دارد و بلافاصله در لحظه شروع پیک فعال می‌شود.

سنسور ESI به دلیل نرخ نمونه‌برداری بالا و الگوریتم مشتق‌گیری از توان، قبل از عبور کامل پیک، هشدار یا فرمان حفاظتی صادر می‌کند. سیستم B می‌تواند پیک را ثبت کند، اما واکنش آن با تأخیر است و برای جلوگیری از آسیب کافی نیست. سیستم A عمدتاً برای اختلالات بلندمدت طراحی و قادر به واکنش به چنین رویداد کوتاه‌مدتی نیست. همچنین نمودار نشان می‌دهد که تفاوت اصلی ESI با تجهیزات حفاظتی مرسوم در سرعت واکنش آن است. این ویژگی باعث می‌شود حتی در نوسانات زیر ۵ms نیز بتوان اقدام حفاظتی انجام داد، در حالی که سایر سیستم‌ها آن را نادیده یا دیر تشخیص می‌دهند.

۵- مقایسه عملکرد سنسور ESI با رله‌ها و آنالایزهای مرسوم

در اغلب کارخانه‌های صنعتی، حفاظت الکتریکی سیستم‌ها بر عهده تجهیزات مانند رله‌های حفاظتی (حساس به جریان یا ولتاژ) و پاور آنالایزها است. این تجهیزات معمولاً برای بررسی شرایط بلندمدت یا شناسایی خطاهای کلاسیک طراحی شده‌اند و در برابر پدیده‌های فوق سریع مانند سکتۀهای انرژی، عملکرد محدودی دارند؛ زیرا اکثر این تجهیزات با نرخ نمونه‌برداری پایین (۵۰۰-۱۰۰۰ هرتز) کار می‌کنند، زمان پاسخ نسبتاً طولانی (۲۰-۵۰ میلی‌ثانیه) دارند، توانایی تحلیل مشق توان یا نرخ تغییر را ندارند و برای شرایط گذرای نیز طراحی نشده‌اند [۲].

بایستی توجه شود سنسور ESI نباید جایگزین همه رله‌ها یا تجهیزات حفاظتی شود؛ بلکه می‌تواند در کنار آن‌ها به‌عنوان لایه‌ی سریع واکنشی عمل کند. در تجهیزاتی که دارای UPS یا دراپو هستند به‌صورت موضعی نصب شود و با اتصال به HMI یا سیستم مانیتورینگ، داده‌های زنده برای تحلیل ارائه دهد.

۶- نتایج استفاده از سنسور ESI در صنایع لاستیک و تحلیل آماری عملکرد سنسور

جهت بررسی دقیق عملکرد سنسور ESI در یک محیط صنعتی واقعی، پروژه آزمایشی در کارخانه تولید تایر [۲] پیاده‌سازی شد. اهداف این آزمایش میدانی بررسی امکان شناسایی ESI واقعی در تجهیزات پرمصرف، ارزیابی واکنش سنسور در برابر نوسانات تیز لحظه‌ای، مقایسه وضعیت سیستم قبل و بعد از نصب سنسور و ثبت داده‌های آماری و تحلیل رفتار سنسور در بازه‌ی زمانی مشخص بوده است. این آزمایش در یکی از خطوط UPS بخش بنویر اجرا شده است و به منظور حفاظت از یک UPS صنعتی ۱۰ kVA مدل Riello، به مدت یک هفته نمونه‌برداری با نرخ ۲۰ kHz ثبت شده و در این بازه سنسور مجموعاً ۲۷ رخداد ESI را ثبت و تحلیل کرد؛ سه رخداد منجر به افزایش شدید شاخص (بیش از ۲.۵) و سیستم فرمان هشدار فوری صادر کرد.

شاخص عملکردی	بهبود	۶ روز پس از نصب سنسور	قبل از نصب سنسور
خاموشی ناگهانی UPS	۷۱٪ کاهش	۰ مورد	۴ مورد
کاهش خطای ناشی از اختلال PLC	۶۷٪ کاهش	۱ مورد	۳ مورد
گزارش رویدادهای شناسایی	۲۷ مورد	۲۷ رویداد ثبت‌شده	صفر (نامشخص)
آگاهی اپراتور از وضعیت شبکه	افزایش محسوب	شغاف و مبتنی بر داده	ضعیف

جدول ۶- مقایسه وضعیت سیستم قبل و بعد از نصب سنسور ESI

نوع رخداد	پاسخ سنسور	مقدار ESI
راهاندازی همزمان دو موتور	فعال‌سازی خروجی آلارم	۲/۸
برق‌دار شدن ناگهانی تابلو دوم	فقط ثبت و هشدار بدون قطع	۱/۹
شوگ لحظه‌ای ناشی از تخلیه خازن	قطع خروجی UPS و فعال‌سازی Bypass	۳/۱

جدول ۵- نمونه رخداد‌های شناسایی‌شده توسط سنسور

سنسور ESI با شناسایی لحظه‌ای اختلالات سریع، به سه روش پیشگیری از وقوع خطای زنجیره‌ای (مثل از کار افتادن هم‌زمان UPS و HMI)، افزایش زمان دسترس‌پذیری سیستم با کاهش خطاهای لحظه‌ای و ارائه اطلاعات تحلیلی برای اقدامات اصلاحی پیشگیرانه قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مفهوم نوین با عنوان ESI برای پایش، شناسایی و واکنش به نوسانات تیز و گذرای توان در محیط‌های صنعتی معرفی شد. با استفاده از این شاخص و طراحی یک سنسور سخت‌افزاری-نرم‌افزاری اختصاصی، امکان تشخیص بلادرنگ نوسانات شدید ولی بسیار کوتاه‌مدت توان فراهم شده است؛ نوساناتی که تاکنون از دید تجهیزات مرسوم حفاظتی پنهان می‌ماندند. بررسی‌های تئوری و عملی نشان داد که پیک‌های انرژی لحظه‌ای می‌توانند در حد چند میلی‌ثانیه رخ داده و منجر به خاموشی UPS، خطای اینورتر، توقف HMI یا حتی خرابی تجهیزات قدرت شوند. تجهیزات مرسوم مانند رله‌های حفاظتی و آنالایزها قادر به تشخیص یا واکنش سریع به این پدیده نیستند ولی سنسور ESI با نرخ نمونه‌برداری بالا، تحلیل مشق توان، و سیستم تصمیم‌گیری سریع، این کمبود را به‌صورت کامل جبران می‌کند. مطالعات و شبیه‌سازی صورت‌گرفته در گزارشات کارخانجات تایر، سنسور ESI فقط در مدت یک هفته، ۲۷ رخداد سکتۀ انرژی را ثبت کرده است. این ویژگی می‌تواند باعث واکنش فوری و جلوگیری از آسیب به تجهیزات شود و همچنین نرخ خاموشی UPS به صفر رسیده است. این اطلاعات در تدوین برنامه سرویس پیشگیرانه و بهینه‌سازی زمان‌بندی روشن شدن تجهیزات بسیار مفید است.

۸- منابع

- Kim, J., Lee, S., Park, Y. (2023). Real-Time Power Quality Event Monitoring System Using Digital Signal Processor for Smart Metering Applications. Journal of Electrical Engineering & Technology, Springer.
- Styvaktakis, E., Bollen, M.J.H., Gu, L.Y.H. (2022). Automated Monitoring and Analysis of Power Quality Disturbances in Industrial Systems. IEEE Transactions on Power Delivery.
- Santoso, S., Powers, E.J. (2023). Power Quality Transient Detection and Characterization Using Deep Learning Techniques. Energies, 16(4), 1915.
- Zhang, H., Li, Y., Chen, F. (2024). Power Quality Transient Disturbance Diagnosis Based on Dynamic Large Convolution Kernel and Multi-Level Feature Fusion Network. Energies, 17(13), 3227.
- Liu, X., Rehtanz, C., Wang, M. (2025). An Intelligent Framework for Multiscale Detection of Power System Events Using Hilbert–Huang Decomposition and Neural Classifiers. Applied Sciences, 15(12), 6404.