

تشخیص و کلاسه‌بندی برخط خطا در یک مزرعه خورشیدی با استفاده از روش بیزین و k نزدیک‌ترین همسایه

مریم صباغ‌پور آرانی^۱، مریم‌السادات اخوان حجازی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

m.sabbaghpur@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

mhejazi@kashanu.ac.ir

چکیده: امروزه منابع تولید پراکنده به‌ویژه سیستم‌های فتوولتائیک به‌عنوان منبع جدید قدرت، درصد بالایی از سرمایه‌گذاری‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. تشخیص و تجزیه و تحلیل خطا در سیستم‌های فتوولتائیک، یکی از مسائل مهم در بخش بازدهی، ایمنی و قابلیت اطمینان آرایه‌های خورشیدی است. به‌دلیل مشخصه غیرخطی خروجی آرایه‌های فتوولتائیک، ماهیت محدودکنندگی جریان، امپدانس خطای بزرگ، شرایط تابش کم، طرح‌های مختلف زمین، شرایط اینورترها و ضعف وسایل حفاظتی، خطاها در آرایه‌ها به‌درستی تشخیص داده نمی‌شوند. بنابراین برای رفع مشکلات حفاظتی، تشخیص خطا استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین براساس اندازه‌گیری ولتاژ و جریان آرایه و تابش و دما در یک سیستم فتوولتائیک ۱۷/۶kw متصل به شبکه پیشنهاد شده است. برای تشخیص نوع و کلاسه‌بندی خطا، انتخاب بهترین روش کلاسه‌بندی با دقت بالا و یافتن ویژگی‌های مناسب در یک آرایه فتوولتائیک در مقیاس تجاری، موضوع مهمی است که تاکنون انجام نشده است. داده‌های ورودی برای تشخیص و کلاسه‌بندی خطا با استفاده از روش بیزین و k نزدیک‌ترین همسایه، نتایج شبیه‌سازی به‌ازای مقادیر ورودی دما و تابش‌های مختلف برای کلاس‌های تعریف‌شده‌ای از عیوب خط‌به‌خط و مدارباز با مقادیر مختلف است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های پیشنهادی یادگیری ماشین، تشخیص نوع خطا در یک رشته از آرایه بسیار موفقیت‌آمیز است.

واژه‌های کلیدی: آرایه فتوولتائیک، کلاسه‌بندی، خطای خط‌به‌خط، خطای مدارباز، یادگیری ماشین، بیزین، k نزدیک‌ترین همسایه.

۱. مقدمه

به گزارش IEA^۱ [۱]، صنعت فتوولتائیک با نرخ رشد متوسط سالانه ۱۵ تا ۲۰ درصد از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۷، رشدی قابل مقایسه با کامپیوترها و نیمه‌هادی‌ها داشته است. در سال ۲۰۱۵، حداقل ۲۲۷ گیگاوات فتوولتائیک در مجموع در سراسر جهان نصب شده است که بیش از ۱/۲ درصد از تقاضای جهانی برق را تشکیل می‌دهد. ظرفیت عملیاتی سیستم‌های فتوولتائیک تا سال ۲۰۱۷، حداقل ۳۰۳ گیگاوات انرژی خورشیدی پیش‌بینی شده است [۲]. به منظور جلوگیری از وقایع غیرقابل انتظار در سیستم‌های فتوولتائیک، تجزیه و تحلیل خطا و مباحث مربوط به تشخیص و حفاظت خطاها بسیار ضروری است. باتوجه به اینکه سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی هیچ قسمت متحرکی ندارند و معمولاً نیاز به تعمیر و نگهداری در آن‌ها بسیار کم است، بازهم شکست‌ها و خطاهایی در بخش‌های آرایه فتوولتائیک، بخش AC، باتری‌ها، سیم‌کشی‌ها و اتصال به شبکه وجود دارد [۳]. مخصوصاً در آرایه‌های فتوولتائیک (بخش DC) که در طول روز از نور خورشید برق‌دار می‌شوند، از مدار خارج کردن کامل مازول‌ها به منظور تشخیص عیب و رفع آن بسیار دشوار است. در مزرعه‌های خورشیدی، اتصال پنل‌ها در حالت‌های سری- موازی به صورت الکتریکی برای دستیابی به ولتاژ و جریان بیشتر، منجر به افزایش ریسک جریان‌های خطای زیاد می‌شود و هر خطایی در پنل‌ها در عملکرد خروجی نهایی تأثیر می‌گذارد.

برای درک رفتار غیرخطی آرایه‌های فتوولتائیک، عملکرد سیستم فتوولتائیک تحت شرایط غیرنرمال، تجزیه و تحلیل خطا، قابلیت اطمینان و مسائل ایمنی برای آرایه‌های فتوولتائیک در [۴، ۵] به درستی مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است.

بر اساس استاندارد (NEC) [۶]، روش‌های وسایل حفاظتی اضافه جریان^۲ (OCPD) و قطع‌کننده تشخیص خطای زمین^۳ (GFDI) مطابق شکل (۱) به طور عمده برای حفاظت خطا در نصب آرایه‌های فتوولتائیک استفاده می‌شوند؛ هرچند که به دلیل محدودیت‌ها و نقاط کور در این طرح‌های حفاظتی [۷] و رفتار غیرخطی خروجی آرایه‌ها تشخیص خطاهای خاص در بخش DC به درستی انجام نمی‌شود، به طوری که چندین خطر آتش‌سوزی در محل نصب فتوولتائیک‌ها گزارش شده است [۸ و ۹].

باتوجه به رفتار آرایه‌ها در حالت‌های مختلف خطا، به دلایل زیر تجزیه و تحلیل و شناسایی خطا در یک مزرعه فتوولتائیک بسیار پیچیده می‌شود:

- شرایط محیطی مانند سطح تابش و دماهای متغیر
- پیری، نقاط داغ و دیگر خطاهای منحصربه‌فرد تکنولوژی‌های مازول‌های فتوولتائیک
- اثرات ردیاب نقطه توان ماکزیمم^۴ (MPPT) در اینورترها بر جریان خطا

این عوامل می‌توانند در مقدار جریان خطا تأثیر بگذارند، به طوری که جریان خطا کمتر از مقادیر قابل انتظار شوند و وسایل حفاظت معمول قادر به شناسایی دقیق خطاها نشوند [۱۰]. بنابراین برای پر کردن نقاط ضعف وسایل حفاظتی، عملکرد ایمن و سالم و جلوگیری از شکست ناگهانی، حداقل نمودن خرابی‌ها، کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و افزایش طول عمر پنل‌های فتوولتائیک و باتوجه به افزایش رشد سریع فناوری‌های کامپیوتری، تکنیک‌های پردازش سیگنال با تکنیک‌های هوش مصنوعی استفاده از روش‌های هوشمند و برخط تشخیص، کلاسه‌بندی و موقعیت خطا، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف در حال توسعه است [۱۱].

این مقاله، روش‌های یادگیری بیزین و K نزدیک ترین همسایه را برای تشخیص و کلاسه‌بندی خطا در آرایه‌های فتوولتائیک ارائه داده است. روش‌های پیشنهادی می‌تواند خطاهایی را که توسط وسایل حفاظتی تشخیص داده نمی‌شوند، به خوبی شناسایی کند و همچنین این روش‌ها فقط با تجهیزات اندازه‌گیری در دسترس مانند ولتاژ و جریان آرایه (معمولاً در MPPTها) و دما و تابش (اطلاعات مربوط به ایستگاه آب و هوایی) قابل پیاده‌سازی است و به تجهیزات و سخت‌افزارهای اضافی و افزایش هزینه نیازی ندارد.

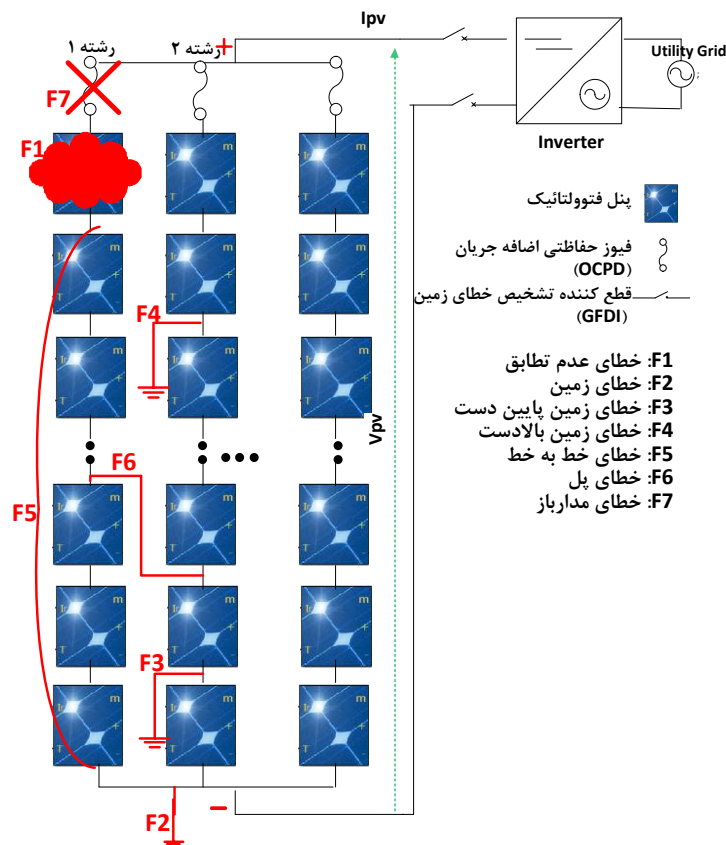
اولین گام در پایش خودکار، تشخیص و شناسایی عیب در سیستم‌های فتوولتائیک، ارزیابی و طبقه‌بندی تمام خطاهای احتمالی می‌باشد. به طور کلی، طبقه‌بندی و تعریف خطاها در سیستم فتوولتائیک به تفکیک موقعیت و نوع در جدول (۱) به طور خلاصه بیان شده است. در شکل (۱)، برخی از خطاهای معمول در آرایه‌ها نشان داده شده است. در بین این خطاها، دو دسته از خطاهای رایج که توسط وسایل حفاظتی به سختی شناسایی می‌شوند، اهمیت ویژه‌ای دارد: ۱. خطاهای خط به خط که به صورت یک مسیر اتصال کوتاه تصادفی بین دو نقطه در یک رشته با پتانسیل متفاوت تعریف می‌شود؛ ۲. خطای مدار باز که به عنوان قطعی ناگهانی به دلیل شکستگی فیزیکی یک پنل، کابل یا قطع اتصال کانکتورهای یک رشته در یک آرایه تعریف می‌شود. در این مقاله، خطاهای زمین در نظر گرفته نشده است، زیرا این خطاها توسط GFDIها تشخیص داده می‌شوند.

1. International Energy Agency
2. Overcurrent Protection Devices
3. Ground Fault Detection Interrupters

4. Maximum Power Point Tracer

جدول (۱): طبقه‌بندی و تعریف خطاهای ممکن در آرایه‌های فتوولتائیک

بخش	نوع خطا	تعریف
آرایه‌های فتوولتائیک (DC)	خطاهای عدم تطابق ^۱	اثر سایه [۱۲]
		پوشش برف و نقطه داغ [۱۳ و ۱۴]
		اثر خاک [۱۵]
	خطای زمین	خطای زمین پایین دست [۱۶]
		خطای زمین بالادست [۱۶]
	خطای خط به خط	خطای خط به خط [۱۶]
		خطای دیود بای پس [۴]
		خطاهای فرسایشی [۱۷]
		خطای پل [۱۶] ^۲
		خطای مدارباز [۱۸]
خطای سیم‌کشی [۱۹]		
-		
بخش AC	خطای اینورتر [۲۰]	
	خطای MPPT [۲۱]	
	خاموشی ناگهانی [۲۲]	



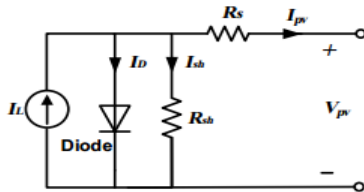
شکل (۱): بلوک دیاگرام یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه به همراه چندین خطا در آرایه‌ها

1. Mismatch Fault
2. Bridging Fault

۳. مطالعه خطاهای الکتریکی در یک آرایه فتوولتائیک

۱.۳. پارامترهای شبیه‌سازی

به دلیل رفتار غیرخطی مشخصه سلول‌های خورشیدی، نمی‌توان آن را مانند یک منبع جریان یا ولتاژ ثابت مدل کرد. در شکل (۲)، مدل تک‌دیوده رایج‌ترین مدل برای توصیف رفتار الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک نشان داده شده است [۳۰]. معادلات جریان این مدل به صورت روابط (۱) تا (۳) است.



شکل (۲): مدار معادل الکتریکی مدل تک‌دیوده سلول فتوولتائیک

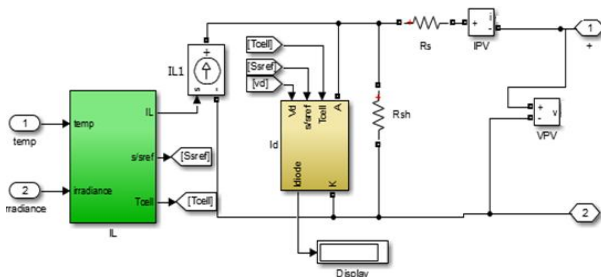
$$I_{pv} = I_L - I_S \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{A \cdot K \cdot T \cdot N_s} \cdot q \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

$$I_L = \frac{G}{G_0} \cdot [I_{L0} + C_T(T - T_0)] \quad (2)$$

$$I_S = I_{S0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{AK} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

بسته به نوع ماده نیمه‌هادی استفاده شده برای ماژول‌های فتوولتائیک، E_g مقادیر متفاوتی دارد که برای کریستال سیلیکونی تقریباً برابر eV است [۳۰]. این معادلات در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی و در نهایت یک پنل با ۲۰ سلول با ورودی دما (T) و تابش (G) و قابلیت سری و موازی شدن برای شبیه‌سازی یک مزرعه خورشیدی متصل به شبکه، مطابق شکل (۳) مدل‌سازی شده است.

مشخصات مدل *SHARP NT-175UC1* با پارامترها و مشخصات یک پنل در شرایط *STC* (شدت تابش 1000 W/m^2 و دمای 25°C) به صورت: $I_{sc} = 4.95 \text{ A}$, $P_{mpp} = 175 \text{ W}$, $V_{oc} = 44/4 \text{ V}$, $V_{mpp} = 35/4 \text{ V}$, $I_{mp} = 5/40 \text{ A}$, $R_s = 0/452$ و $R_{SH} = 400$ است.



شکل (۳): مدل‌سازی معادلات حاکم بر مدار معادل الکتریکی سلول فتوولتائیک

در بخش دوم این مقاله، روش‌های موجود تشخیص خطا در آرایه‌های فتوولتائیک بیان می‌شود. نتایج رفتار خطای خطبه‌خط و خطای مدار باز را در یک مزرعه خورشیدی 10×10 با توان $17/6 \text{ Kw}$ در نرم‌افزار *MATLAB/Simulink* در بخش سوم بیان می‌شود. در بخش چهارم، مفاهیم روش‌های شناسایی الگو و روش‌های بی‌زین و k نزدیک‌ترین همسایه توضیح داده می‌شود. در بخش پایانی نتایج به دست آمده از روش‌های پیشنهادی، برای تشخیص و کلاسه‌بندی نوع خطای خطبه‌خط و مدار باز ارائه می‌شود.

۲. مروری بر روش‌های تشخیص خطا در بخش آرایه‌های

فتوولتائیک

خروجی یک مجموعه آرایه فتوولتائیک، چه در حالت خطا و چه در حالت معمول، دارای مشخصه جریان برحسب ولتاژ غیرخطی است. زمانی که خطایی در آرایه رخ دهد با تغییر شکل منحنی، پارامترها و نقاط بسیار مهم مانند جریان و ولتاژ در نقطه توان ماکزیمم و ولتاژ مدارباز و جریان اتصال کوتاه تغییر می‌کند. اگر این خطا توسط وسایل حفاظتی تشخیص داده نشود، قسمتی از آرایه که در آن خطا رخ داده است، در حالت بهینه خود عمل نمی‌کند. بنابراین مانیتورینگ به موقع و برخط سیستم فتوولتائیک، برای نظارت بر عملکرد قسمت‌های مختلف آن، به منظور جلوگیری از به وجود آمدن عیب یا تشخیص بموقع آن اهمیت پیدا می‌کند.

تشخیص خطا به عنوان علامتی به نشانه وجود مشکل در سیستم مانیتورینگ تعریف می‌شود [۲۳]. علاوه بر تشخیص، کلاسه‌بندی آن می‌تواند به صورت خودکار نوع خطا را مشخص کند که برای پیش و تعیین مسائل غیرقابل انتظار در سیستم‌های خورشیدی بسیار ضروری است. روش‌های تشخیص خطا در آرایه‌های فتوولتائیک را می‌توان به سه سناریو مطابق جدول (۲) تقسیم‌بندی کرد. روش انتخابی در این مقاله، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین بخش یادگیری با نظارت گسسته (روش‌های شناسایی الگو) است [۲۴] که در سال‌های اخیر، استفاده از این تکنیک‌ها توسعه داده شده است [۲۵-۲۹]. به کارگیری این روش در حالت متصل به شبکه و به صورت برخط، تشخیص و کلاسه‌بندی نوع خطا، پیاده‌سازی با حداقل هزینه در مزارع خورشیدی از قابلیت‌های به کارگیری روش‌های شناسایی الگوست. جمع‌آوری و آموزش داده‌های یک روز تابستانی (منحصره‌فرد)، انتخاب نادرست بردار ویژگی برای ورودی سیستم مانیتورینگ، بررسی خطاهای غیرمعمول در آرایه‌ها و در نظر گرفتن اندازه کوچک برای آرایه‌ها محدودیت‌های تحقیقات انجام شده تاکنون است.

جدول (۲): مروری بر سناریوهای تشخیص خطا در آرایه‌های فتوولتائیک

نوع سناریو	روش‌ها	معیار تشخیص	نوع خطا	تشخیص خطا	کلاس‌بندی خطا
تشخیص براساس مدل کمی	تحلیل منحنی I-V [۳۱]	تغییر مشخصه خروجی آرایه و پارامترهای آن در حالت سالم و خطا	- خطای زمین - خطای خطبه‌خط - خطای مدارباز - خطاهای عدم تطابق	✓	✓
	مقایسه عملکرد ^۱ [۲۵]	مقایسه توان واقعی خروجی AC ماینیتور شده (P_{actual}) با توان خروجی AC شبیه‌سازی شده (P_{sim})	- خطای خطبه‌خط - خطای مدارباز - خطاهای عدم تطابق	✓	×
	نسبت عملکرد ^۲ [۳۲]	نرمال‌سازی پارامترهای بازده انرژی سیستم فتوولتائیک برای ارزیابی عملکرد آن	- خطای مدارباز - خطاهای عدم تطابق - خطای اینورتر - خطاهای MPPT	✓	×
	تحلیل تلفات توان [۳۳]	تعریف محدوده برای تلفات اندازه‌گیری شده (L_{C-mes})	- خطای مدارباز - خطاهای عدم تطابق	✓	×
تشخیص براساس داده‌های تاریخی	روش‌های آماری [۳۴]	استفاده از روش‌های آمار توصیفی و استنباطی در تولید انرژی اندازه‌گیری شده هر کدام از زیرمجموعه‌های یک مزرعه خورشیدی	- خطای زمین - خطای خطبه‌خط - خطاهای سیم‌کشی	✓	×
	روش‌های یادگیری ماشین [۱۱]	آموزش یک سیستم هوشمند براساس داده‌های جمع‌آوری شده در حالت سالم و خطا	- خطای خطبه‌خط - خطای مدارباز - خطاهای عدم تطابق	✓	✓
تشخیص براساس پردازش سیگنال	ماینیتورینگ مقاومت عایقی [۳۵]	کاهش چشمگیر مقاومت عایقی تعبیه شده در حالت خطاهای عایقی و یا خطاهای تماسی مستقیم (خطاهای زمین خطرناک)	- خطای زمین	✓	×
	اشکار ساز جریان باقی مانده [۳۶]	جمع جریان‌های وارد شده و خارج شده از زون‌های حفاظتی تعریف شده در آرایه‌های فتوولتائیک (همانند رله حفاظتی)	- خطای زمین - خطای خطبه‌خط	✓	×
	بازتاب حوزه زمان ^۴ [۳۷]	روش اندازه‌گیری براساس ارسال سیگنال‌های پالسی و تحلیل شکل موج‌های برگشتی	- خطای زمین - خطای خطبه‌خط	✓	✓
	بازتاب حوزه زمان طیف گسترده ^۵ [۳۸]	سطح سیگنال‌های تست پایین و امنیت نویز بالا نسبت به روش TDR	- خطای زمین - خطاهای سیم‌کشی	✓	✓
	ترموگرافی مادون قرمز ^۶ [۳۹]	استفاده از دستگاه ترموگرافی مادون قرمز به صورت دوره‌ای و مکرر توسط تکنسین	- خطاهای عدم تطابق	✓	×
	تغییر مقاومت سری داخلی [۴۰]	افزایش چشمگیر در مقاومت R_S سری شده	- خطاهای عدم تطابق - خطاهای فرسایشی	✓	×

1. Performance Comparison
2. Performance Ratio
3. Residual Current Detector (RCD)
4. Time Domain Reflectometry (TDR)
5. Spread Spectrum Time Domain Reflectometry (SSTDR)
6. Infrared Thermography

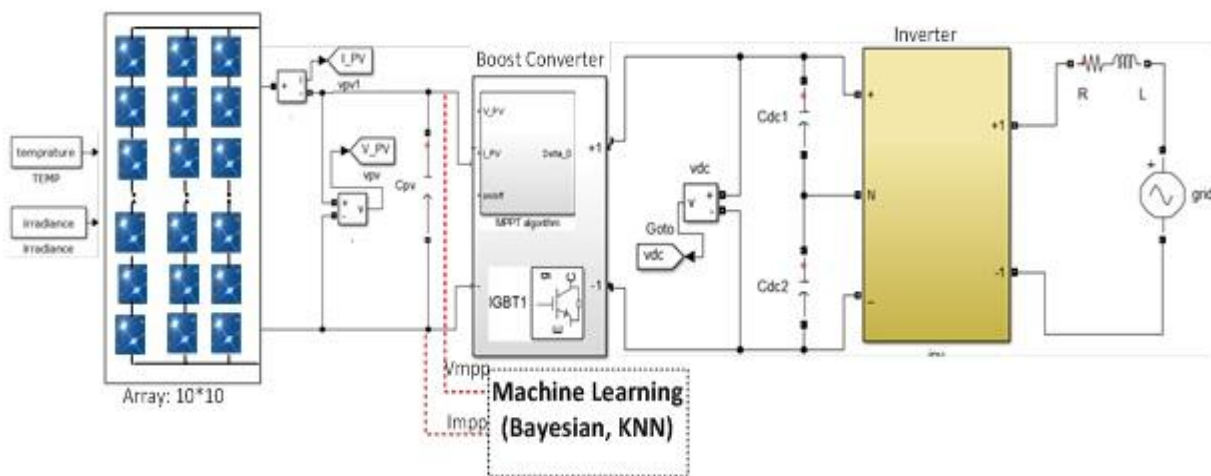
ولتاژ ماکزیمم (V_{mpp})، نقطه جریان ماکزیمم (I_{mpp}) و نقطه توان ماکزیمم (P_{mpp}) برای حالت‌های مختلف خطا استخراج می‌شود.

جدول (۳): پارامترهای شبیه‌سازی یک سیستم متصل به شبکه ۱۷/۶ Kw

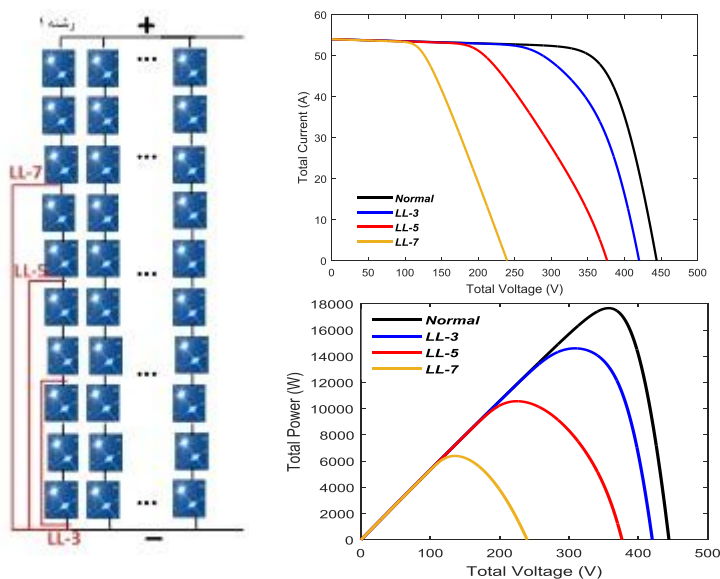
نماد	توصیف	مقدار
C_{pv}	خازن لینک DC: (برای حداکثر ۱۰ ولت ریبل به‌ازای چگالی تابش 1000 w/m^2)	$80 \times 10^{-4} \text{ (F)}$
R, L	فیلتر واسط اینورتر و شبکه	$R = 0.01 \Omega$ $L = 2 \text{ mH}$
C_{dc1} , C_{dc2}	فیلتر خازنی	$800 \mu\text{f}$
V_{MPPT}	نرخ ولتاژ MPPT (الگوریتم کنترلی P&O)	$V_{MPPTmax} = 500 \text{ v}$ $V_{MPPTmin} = 230 \text{ v}$

در سیستم مورد مطالعه شبیه‌سازی شده یک آرایه 10×10 (۱۰ پنل به صورت سری و ۱۰ رشته به صورت موازی) با توان $17/6 \text{ Kw}$ مطابق شکل (۴) از طریق یک مبدل بوست توسط الگوریتم MPPT کنترلی (P&O) [۴۲]، ولتاژ و جریان DC آرایه را نمونه‌برداری و نقطه کار ماکزیمم را تعیین و توسط پالس‌های ارسالی، ولتاژ فتوولتائیک را در مد ماکزیمم نقطه توان (MPP) نگه می‌دارد و به یک اینورتر تک‌فاز متصل به شبکه برق (400 ac ، 60 Hz) و فیلتر واسط با مشخصاتی مطابق جدول (۳) متصل است.

از آنجایی که در موقعیت‌های مختلف خطا، منحنی خروجی آرایه I-V، در نتیجه نقاط توان ماکزیمم (MPP) تغییر می‌کند [۴۳]، برای شناسایی و کلاسه‌بندی نوع خطا، مقادیر تابش (w/m^2)، دما ($^{\circ}\text{C}$)، نقطه



شکل (۴): مدل یک سیستم مورد مطالعه فتوولتائیک متصل به شبکه شبیه‌سازی شده



شکل (۵): اعمال خطای خطبه‌خطها در یک مزرعه خورشیدی متصل به شبکه در حالت STC

آرایه با M تعداد پنل به صورت $LL - M$ تعریف می‌شود. برای تحلیل رفتار خطای خطبه‌خط در یک رشته، خطاهای خطبه‌خط با ۳، ۵ و ۷ پنل

۲.۳. خطای خطبه‌خط

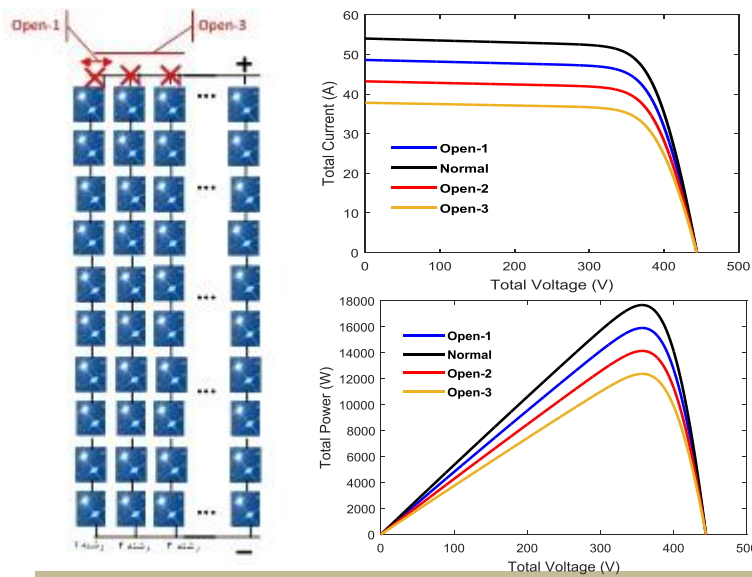
خطای خطبه‌خط به‌عنوان اتصال کوتاه شدن بین دو نقطه از یک رشته در

به صورت موازی تشکیل شده است. اگر به هر دلیلی، قطع شدنی در یکی از رشته‌ها رخ دهد، خروجی آن رشته صفر می‌شود. مدل شبیه‌سازی شده برای بررسی رفتار آرایه در حالت قطع یک رشته، معادل $Open - 1$ ، دو رشته $Open - 2$ و سه رشته $Open - 3$ در وضعیت استاندارد STC مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۶) منحنی I-V برای این سه حالت خطا در حالت STC نشان داده شده است که در آن زمانی که خطای $Open - M$ در یک آرایه اتفاق می‌افتد، ولتاژ اتصال کوتاه آرایه در V_{oc} ثابت ولی جریان اتصال کوتاه کل آرایه به مقدار $M \times I_{sc}$ کاهش می‌یابد.

در سیستم متصل به شبکه شکل (۳) در شرایط STC شبیه‌سازی شده و منحنی I-V خروجی به صورت شکل (۵) می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نقاط توان ماکزیمم در شرایط خطای مختلف تغییر کرده، بنابراین تجزیه و تحلیل نقاط این منحنی، یکی از بهترین روش‌ها برای تشخیص رفتار آرایه است. زمانی که خطای $LL - M$ در یک رشته اتفاق می‌افتد، ولتاژ اتصال کوتاه به مقدار $M \times V_{oc}$ کاهش می‌یابد، ولی جریان اتصال کوتاه تمام رشته‌ها در I_{sc} باقی می‌ماند.

۳.۳. خطای مدارباز

همان‌طور که بیان شد، آرایه فتوولتائیک شبیه‌سازی شده از اتصال ۱۰ رشته



شکل (۶): اعمال خطای مدارباز متفاوت در یک مزرعه خورشیدی متصل به شبکه در حالت STC

تعریف شده در حالت‌های مختلف سالم و خطا جمع‌آوری می‌شود. معمولاً بردارهای ویژگی برای M کلاس برای داده‌های تست با داده‌های آموزش متفاوت است، به طوری که طراح در هنگام طراحی با داده‌های آموزشی، متناوباً مجموعه تست را به مدل اعمال کرده و با محاسبه خطای مدل به ورودی آموزش و تست تنظیماتی در مدل یا روش آموزش انجام می‌دهد. برای آموزش و تست سیستم تشخیص الگو، سه پارامتر بسیار مهم در منحنی ولتاژ و جریان کل آرایه شامل $(P_{mpp}, I_{mpp}, V_{mpp})$ به عنوان بردارهای ویژگی در ۵ کلاس‌های تعریف شده ($Open - NORMAL$ ، $LL - 7$ و $LL - 3$ ، $Open - 3$ ، 1) استخراج می‌شوند؛ زیرا این سه پارامتر نسبت به حالت خطا و همچنین با ورودی‌های مختلف (شرایط تابش و دمای متفاوت) حساسیت بیشتری نشان می‌دهد.

داده‌های آموزش به صورت مجموعه‌ای از بردارهای ویژگی V_{mpp} ، I_{mpp} ، P_{mpp} در شرایط محیطی محدود تابش از 180 W/m^2 تا 980 W/m^2 با گام‌های ۵۰ و دما از 20°C تا 60°C با گام‌های 10°C و همچنین برای مجموعه داده‌های تست نیز بردارهای ویژگی V_{mpp}

۴. مفاهیم اصلی در سیستم‌های یادگیری ماشین

در طراحی سیستم‌های تشخیص الگو، نیازمند داده‌هایی از مشخصه خروجی آرایه‌های فتوولتائیک است که به خوبی رفتار آن را در حالت‌های خطا و سالم توصیف کنند و بتوان بین داده‌های مربوط به کلاس‌های مختلف تمایز قائل شد. به مشخصه‌هایی که برای تمایز دادن بین کلاس‌ها انتخاب می‌شود، ویژگی^۱ گفته می‌شود. در طراحی سیستم‌های تشخیص الگو با داده، عموماً از دو مجموعه جدا از هم مجموعه آموزشی^۲ (بزرگ‌ترین مجموعه برای به دست آوردن پارامترهای مدل) و مجموعه‌ای کوچک‌تر از آموزشی به عنوان مجموعه تست^۳ (برای تنظیم پارامترهای طراحی و نیز برای آزمودن و جلوگیری از یادگیری بیش از حد^۴ مدل) تشکیل شده است. بنابراین مجموعه آموزشی متشکل از بردار ویژگی d بعدی $X = (x_1, \dots, x_d)^T$ برای M کلاس $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$

1. Feature
2. Training Set
3. Test Set
4. Overlearning

۱.۴. تشخیص و کلاسه‌بندی خطا به روش بیزین

قاعده تصمیم‌گیری شناخته‌شده بیز، الگویی را به کلاسی با بیشترین چگالی‌های احتمال شرطی اختصاص می‌دهد که تمامی اطلاعات موجود درباره اعضای هر کلاس را شامل می‌شود. فرض کنید M کلاس ω_1 ، ω_2 ، ...، ω_i که هر کلاس ω_i شامل N_i نمونه است. هدف تعیین کلاس بردار ویژگی d بعدی $X = (x_1, \dots, x_d)^T$ است. برای این کار باید M احتمال شرطی $P(\omega_i | X)$ $i = 1, \dots, M$ تعیین شود [۴۴]. بدیهی است که هرکدام از ω_i ، که دارای $P(\omega_i | X)$ بزرگ‌تر باشد، عضو آن کلاس است. با توجه به قوانین احتمال این احتمال شرطی می‌تواند به صورت زیر به دست آید:

$$P(\omega_i | X) = \frac{P(\omega_i)p(X|\omega_i)}{p(X)}, \quad i = 1, \dots, M \quad (۴)$$

در این مقاله، از توزیع گوسی چندمتغیره برای تابع چگالی احتمال شرطی هر کلاس به صورت معادله (۵) استفاده شده است:

$$p(X|\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |C_i|^{1/2}} \exp \left[-\frac{(X - \mu_i)^T C_i^{-1} (X - \mu_i)}{2} \right] \quad (۵)$$

که در آن، μ_i و C_i به ترتیب بردار میانگین و ماتریس کواریانس کلاس ω_i هستند.

با به کارگیری معادله (۴) در (۵)، X به کلاس ω_i متعلق است در صورتی که:

$$\omega(X) = \omega_i \quad (۶)$$

$$i = \arg \max_{k=1, \dots, M} \left\{ \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |C_k|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (X - \mu_k)^T C_k^{-1} (X - \mu_k) \right] P(\omega_k) \right\}$$

عبارت کلاسه‌بندی‌کننده، نسبت به (نرخ) خطای کمینه با توزیع نرمال بردار اندازه‌گیری شده برابر است با:

$$\omega(X) = \omega_i \Rightarrow i = \arg \max_{k=1, \dots, M} \{ W_1 + X^T W_2 + X^T W_3 X \} \quad (۷)$$

$$W_1 = -\ln |C_k| + 2 \ln P(\omega_k) - \mu_k^T C_k^{-1} \mu_k$$

$$W_2 = 2 C_k^{-1} \mu_k$$

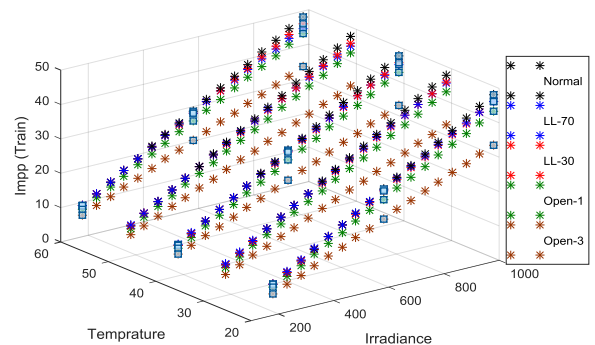
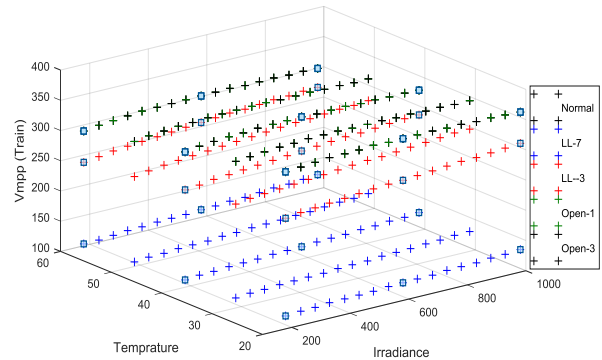
$$W_3 = -C_k^{-1}$$

کلاسه‌بندی براساس معادله (۷) را کلاسه‌بندی‌کننده درجه دو^۱ یا تابع تفکیک‌کننده درجه دو و تابع تصمیم‌گیری^۲ را تابع تصمیم‌گیری درجه دو می‌نامند، مرز بین قسمت‌های مختلف تابع تصمیم‌گیری، قطعه‌هایی از ابر صفحه^۳هایی (ابر رویه- ابر سطح) درجه دو در فضای d بعدی هستند [۴۵].

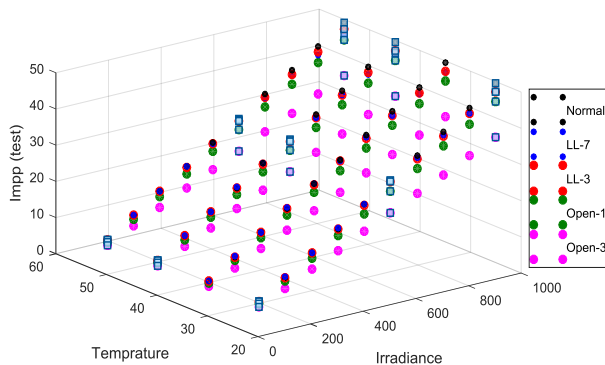
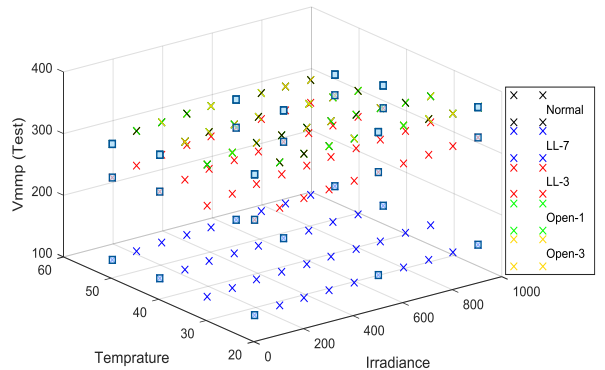
1. Quadratic Classifier
2. Decision Function
3. Hypersur Faces

P_{mpp} I_{mpp} در شرایط تابش از 100 W/m^2 تا 1000 W/m^2 با گام‌های 100 W/m^2 و دما از 25°C تا 55°C با گام‌های 10°C تعریف شده است.

تغییرات این پارامترها نسبت به دما و تابش‌های مختلف تعریف شده به صورت شکل‌های (۷) و (۸) است.



شکل (۷): توزیع بردارهای آموزشی V_{mpp} ، I_{mpp} در کلاس‌های مختلف با مقادیر تابش و دمای تعریف شده



شکل (۸): توزیع بردارهای تست I_{mpp} ، V_{mpp} در کلاس‌های مختلف با مقادیر تابش و دمای تعریف شده

۲.۴. تشخیص و کلاسه‌بندی خطا به روش K نزدیک‌ترین

همسایه

در دسته‌بندی به روش K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) تابع توزیع احتمال به صورت محلی در فضای ورودی به حجم V برای هر کلاس تخمین زده می‌شود اگر k تعداد نمونه‌ها از کل N نمونه در حجم V باشد [۴۶]. فرض کنید در k نمونه، k_i نمونه از ω_i کلاس وجود داشته باشد (به طوری که $\sum_{i=1}^c k_i = k$ ، که در آن c تعداد کلاس‌هاست).

همچنین فرض کنید تعداد کل نمونه‌ها در کلاس ω_i ، N_i باشد (به طوری که $\sum_{i=1}^c N_i = N$). در این صورت می‌توان تخمینی از

$P(X|\omega_i)$ و $p(\omega_i)$ به صورت معادله (۸) زد:

$$P(X|\omega_i) = \frac{k_i}{N_i V} \quad (8)$$

$$p(\omega_i) = \frac{N_i}{N} \quad (9)$$

قانون تصمیم‌گیری، X را به کلاس ω_i نسبت می‌دهد اگر:

$$P(\omega_i|x) \geq P(\omega_j|x), \quad \forall j \quad (10)$$

با استفاده از تئوری بیز می‌توان نوشت:

$$\frac{k_i}{N_i V} \cdot \frac{N_i}{N} \geq \frac{k_j}{N_j V} \cdot \frac{N_j}{N}, \quad \forall j \quad (11)$$

و این یعنی X را به کلاس ω_i نسبت می‌دهد اگر:

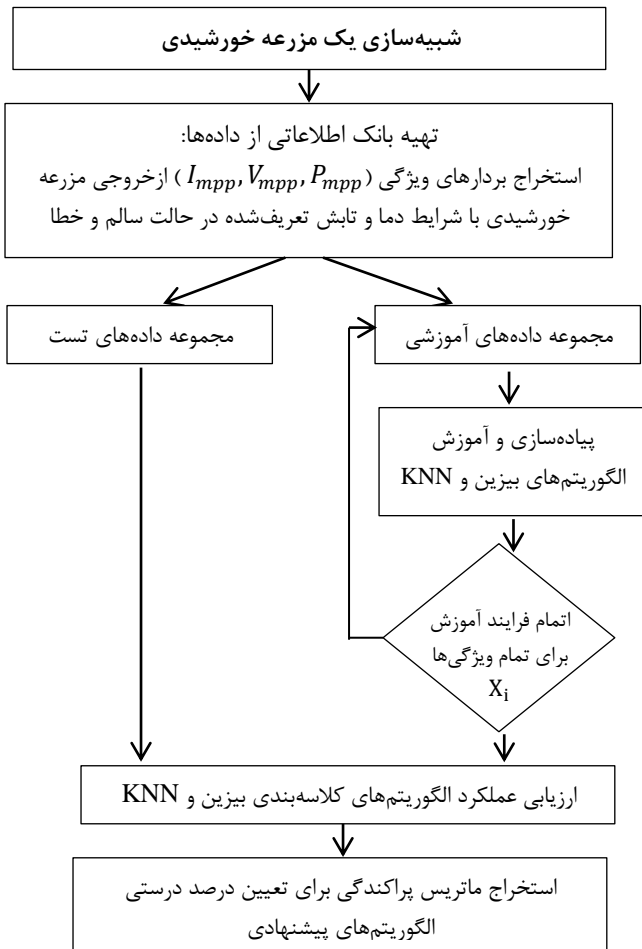
$$k_i \geq k_j, \quad \forall j \quad (12)$$

بنابراین قانون تصمیم‌گیری، داده تست X را به کلاسی نسبت می‌دهد که بیشترین تعداد نمونه را در نزدیک‌ترین k نمونه داشته باشد. در این روش، فاصله X تا تمامی داده‌های آموزشی محاسبه شده و k داده نزدیک‌ترین انتخاب می‌شود. در این k داده هر کلاسی که بیشترین سهم را داشته باشد، در آن کلاس دسته‌بندی می‌شود [۴۷].

۵. نتایج شبیه‌سازی

نتایج روش‌های کلاسه‌بندی در نهایت به صورت یک ماتریس پراکندگی^۱ نشان داده می‌شوند. در واقع این ماتریس، عملکرد این الگوریتم‌ها را به صورت جدول به صورت کمی نشان می‌دهد. هر ستون از ماتریس نشان‌دهنده تعداد داده‌های واقعی در یک کلاس (Truth data) و هر سطر نشان‌دهنده تعداد داده‌های پیش‌بینی شده در هر کلاس توسط الگوریتم‌های شناسایی الگو (Classifier Result) می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده در قسمت‌های قبل، طرح‌واره الگوریتم پیشنهادی برای

تشخیص و کلاسه‌بندی عیوب خطبه‌خط و مدار باز در مزرعه خورشیدی به صورت شکل (۹) پیشنهاد می‌شود.



شکل (۹): طرح‌واره استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی برای تشخیص عیوب در یک مزرعه خورشیدی

برای تشخیص و کلاسه‌بندی نوع خطا، ۳ بردار ویژگی ($d=3$) (P_{mpp} , I_{mpp} , V_{mpp}) و ۴ نوع خطای ۳-LL، ۷-LL، $Open-1$ و $Open-3$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

- CLASS-1 = $Open - 1$
- CLASS-2 = $Open - 3$
- CLASS-3 = NORMAL
- CLASS-4 = $LL - 3$
- CLASS-5 = $LL - 7$

در شکل (۱۰) که ماتریس پراکندگی روش بیزین را نشان می‌دهد، جعبه قرمز از سمت چپ در اولین سطر به معنای این است که ۹۰ درصد از داده‌های موجود در کلاس ۱ ($Open - 1$) به درستی در کلاس ۱ و ۱۰ درصد از داده‌ها به اشتباه توسط روش بیزین در کلاس ۳ (Normal) تشخیص داده شده‌اند. بنابراین درصد درستی روش بیزین برای کلاس ۱، ۹۰ درصد است. در مجموع، درصد درستی روش بیزین برای تشخیص و کلاسه‌بندی خطاهای تعریف شده ۶۰ درصد است. در روش KNN،

1. Confusion Matrix

سیستم فتولتائیک ارائه شد. در این میان، روش استفاده از الگوریتم‌های یادگیری به‌دلیل سادگی در اجرا، تشخیص و کلاسه‌بندی نوع خطا در کوتاه‌ترین زمان ممکن و استفاده از داده‌های در دسترس خروجی آرایه‌های خورشیدی انتخاب شد. با اعمال روش‌های بیزین و KNN برای تفسیر نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده بر آرایه فتولتائیک 10×10 متصل به شبکه مورد مطالعه، به منظور تشخیص و کلاسه‌بندی خطای خطبه‌خط $LL-3$ و $LL-7$ و خطای مدارباز $Open-1$ و $Open-3$ از یکدیگر پرداخته شد. با مقایسه نتایج روش‌های به‌کارگرفته‌شده می‌توان گفت که در بین روش‌های بیزین و KNN با Kهای مختلف در مجموع روش KNN با $K=3$ دارای بیشترین دقت برای تشخیص و کلاسه‌بندی نوع خطا در یک آرایه 10×10 با توان $17/6$ Kw است.

فهرست علائم

E_g	انرژی پهنای باند مواد (eV)
q	بار الکترون = 1.6×10^{-19} کولن
K	ثابت بولتزمن = 1.38×10^{-23} J/K
N_S	تعداد سلول سری شده در هر پنل
I_{pv}	جریان سلول خورشیدی (A)
I_L	جریان نوری تولیدشده (A)
I_D	جریان دیود (A)
I_{SH}	جریان مقاومت موازی (A)
I_S	جریان اشباع دیود (A)
I_{SO}	جریان اشباع مرجع (A)
T	دمای محیط (کلوین)
T_0	دمای مرجع (کلوین) = $273 + 25$
G	شدت تابش محیط (W/m^2)
G_0	شدت تابش مرجع (W/m^2) = 1000
C_T	ضریب دمای جریان نوری تولیدشده (A/K)
R_S	مقاومت سری سلول خورشیدی (اهم)
R_{SH}	مقاومت موازی سلول خورشیدی (اهم)
V_{pv}	ولتاژ سلول خورشیدی (V)

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت مالی و هم‌فکری اعضای شورای پژوهشی پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان، بی‌نهایت سپاسگزاری می‌کنند.

به‌ازای Kهای مختلف ($K=1, 2, \dots, 10$)، $K=3$ درصد درستی بیشتری به‌دست آمد که در شکل (۱۱)، ماتریس پراکندگی روش KNN با $K=3$ نشان داده شده که در مجموع برای $K=3$ دارای درصد درستی ۸۳/۵ درصد است.

Classifier results	Class ۱	۳۶ ٪۹۰	۰ ٪۰	۱ ٪۲/۵	۱ ٪۲/۵	۱ ٪۲/۵	٪۹۲/۳۰
	Class ۲	۰ ٪۰	۴۰ ٪۱۰۰	۰ ٪۰	۰ ٪۰	۰ ٪۰	٪۱۰۰
	Class ۳	۴ ٪۱۰	۰ ٪۰	۱۲ ٪۳۰	۱۴ ٪۳۵	۶ ٪۱۵	٪۳۳/۳۳
	Class ۴	۰ ٪۰	۰ ٪۰	۸ ٪۲۰	۵ ٪۱۲/۵	۶ ٪۱۵	٪۲۶/۳۱
	Class ۵	۰ ٪۰	۰ ٪۰	۱۹ ٪۴۷/۵	۲۰ ٪۵۰	۲۷ ٪۶۷/۵	٪۴۰/۹۰
			٪۹۰	٪۱۰۰	٪۳۰	٪۱۲/۵	٪۶۷/۵
	Class ۱	Class ۲	Class ۳	Class ۴	Class ۵		

شکل (۱۰): ماتریس پراکندگی حاصل از نتایج روش بیزین برای تشخیص نوع خطا

Classifier results	Class ۱	۳۳ ٪۸۲/۵	۷ ٪۱۷/۵	۳ ٪۷/۵	۰ ٪۰	۰ ٪۰	٪۷۶/۷۴
	Class ۲	۴ ٪۱۰	۳۰ ٪۷۵	۲ ٪۵	۰ ٪۰	۱ ٪۲/۵	٪۸۱/۰۸
	Class ۳	۳ ٪۷/۵	۲ ٪۵	۳۵ ٪۸۷/۵	۳ ٪۷/۵	۰ ٪۰	٪۸۱/۳۹
	Class ۴	۰ ٪۰	۱ ٪۲/۵	۰ ٪۰	۳۴ ٪۸۵	۴ ٪۱۰	٪۸۷/۱۷
	Class ۵	۰ ٪۰	۰ ٪۰	۰ ٪۰	۳ ٪۷/۵	۳۵ ٪۸۷/۵	٪۹۲/۱۰
			٪۸۲/۵	٪۷۵	٪۸۷/۵	٪۸۵	٪۸۷/۵
	Class ۱	Class ۲	Class ۳	Class ۴	Class ۵		

شکل (۱۱): ماتریس پراکندگی حاصل از نتایج روش KNN ($K=3$) برای تشخیص نوع خطا

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا با بررسی و طبقه‌بندی منابع و محل بروز خطا در یک سیستم فتولتائیک، روش‌های کنونی تشخیص خطا در بخش DC یک

مراجع

- [1] IEA, "Cost and Performance Trends in Grid-Connected Photovoltaic System and Case Studies 2007", International Energy Agency, 2007.
- [2] Green, M. A., "Commercial Progress and Challenges for Photovoltaics", Nature Energy, Vol. 1, pp. 15015, 2016.
- [3] Harb, S., Balog, R. S., "Reliability of Candidate

- Photovoltaic Module-Integrated-Inverter (PV-MII) Topologies—a Usage Model Approach*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, pp. 3019-3027, 2013.
- [4] Davarifar, M., Rabhi, A., El Hajjaji, A., "Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis their Effect in DC side of Photovoltaic System", Energy and Power Engineering, Vol. 5, pp. 230, 2013.
- [5] Gokmen, N., Karatepe, E., Celik, B., Silvestre, S., "Simple Diagnostic Approach for Determining of Faulted PV Modules in String Based PV Arrays", Solar Energy, Vol. 86, pp. 3364-3377, 2012.
- [6] N. F. P. Association, *NFPA 70: National Electrical Code: National Fire Protection Assoc*, 2002.
- [7] Flicker, J., Johnson, J., "Analysis of Fuses for Blind Spot Ground Fault Detection in Photovoltaic Power Systems", Sandia National Laboratories Report, 2013.
- [8] Brooks, B., "The Bakersfield Fire", Solar Pro, Vol. 4, pp. 62, 2011.
- [9] Hernday, P., "Field Applications for IV Curve Tracers", Solarpro Magazine, pp. 77-106, 2011.
- [10] Xu, X., Wang, H., Zuo, Y., "Method for Diagnosing Photovoltaic Array Fault in Solar Photovoltaic System", in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, pp. 1-5, 2011.
- [11] Zhao, Y., Ball, R., Mosesian, J., de Palma, J-F., Lehman, B., "Graph-Based Semi-Supervised Learning for Fault Detection and Classification in Solar Photovoltaic Arrays", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, pp. 2848-2858, 2015.
- [12] Nguyen, X. H., "Matlab/Simulink Based Modeling to Study Effect of Partial Shadow on Solar Photovoltaic Array", Environmental Systems Research, Vol. 4, pp. 1, 2015.
- [13] Heidari, N., Gwamuri, J., Townsend, T., Pearce, J. M., "Impact of Snow and Ground Interference on Photovoltaic Electric System Performance", IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5, pp. 1680-1685, 2015.
- [14] Wendlandt, S., Drobisch, A., Buseth, T., Krauter, S., Grunow, P., "Hot Spot Risk Analysis on Silicon Cell Modules", in 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 2010.
- [15] Hammond, R., Srinivasan, D., Harris, A., Whitfield, K., Wohlgenuth, J., "Effects of Soiling on PV Module and Radiometer Performance", in Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, pp. 1121-1124, 1997.
- [16] Zhao, Y., de Palma, J.-F., Mosesian, J., Lyons, R., Lehman, B., "Line-line fault Analysis and Protection Challenges in Solar Photovoltaic Arrays", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 60, pp. 3784-3795, 2013.
- [17] Makrides, G., Zinsser, B., Georghiou, G. E., Schubert, M., Werner, J. H., "Degradation of Different Photovoltaic Technologies under Field Conditions", in Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pp. 002332-002337, 2010.
- [18] Akram, M. N., Lotfifard, S., "Modeling and Health Monitoring of DC Side of Photovoltaic Array", Sustainable Energy, IEEE Transactions on, Vol. 6, pp. 1245-1253, 2015.
- [19] Schimpf, F., Norum, L. E., "Recognition of Electric Arcing in the DC-Wiring of photovoltaic Systems", in INTELEC 2009-31st International Telecommunications Energy Conference, pp. 1-6, 2009.
- [20] Chan, F., Calleja, H., "Reliability: A New Approach in Design of Inverters for PV Systems", in 2006 IEEE International Power Electronics Congress, pp. 1-6, 2006.
- [21] Esmar, T., Chapman, P. L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion EC, Vol. 22, pp. 439, 2007.
- [22] Omer, A. M., "Renewable Energy Resources for Electricity Generation in Sudan", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, pp. 1481-1497, 2007.
- [23] Gertler, J., *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*: CRC Press, 1998.
- [24] Huang, G.-B., Ding, X., Zhou, H., "Optimization Method Based Extreme Learning Machine for Classification," Neurocomputing, Vol. 74, pp. 155-163, 2010.
- [25] Drews, A., De Keizer, A., Beyer, H., Lorenz, E., Betcke, J., et al., "Monitoring and Remote Failure Detection of Grid-Connected PV Systems Based on Satellite Observations," Solar Energy, Vol. 81, pp. 548-564, 2007.
- [26] Zhao, Y., Yang, L., Lehman, B., de Palma, J.-F., Mosesian, J., Lyons, R., "Decision Tree-Based Fault Detection and Classification in Solar Photovoltaic Arrays", in 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 93-99, 2012.
- [27] Hu, B., "Solar Panel Anomaly Detection and Classification", 2012.
- [28] Zhao, Y., Lehman, B., Ball, R., Mosesian, J., de Palma, J.-F., "Outlier Detection Rules for Fault Detection in Solar Photovoltaic Arrays", in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, pp. 2913-2920, 2013.
- [29] Omran, W. A., Kazerani, M., Salama, M. M., "A Clustering-Based Method for Quantifying the Effects of Large on-Grid PV Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, pp. 2617-2625, 2010.
- [30] King, D.L., Kratochvil, J. A., Boyson, W. E., "Photovoltaic Array Performance Model " United States. Department of Energy, 2004.
- [31] Miwa, M., Yamanaka, S., Kawamura, H., Ohno, H., "Diagnosis of a Power Output Lowering of PV ARRAY with a (-dI/dV)-V Characteristic", in Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, pp. 2442-2445, 2006.
- [32] Haeberlin, H., Beutler, C., "Normalized Representation of Energy and Power for Analysis of Performance and on-line Error Detection in PV-Systems", in Proc. 13th EU PV Conf., Nice, pp. 934, 1995.
- [33] Chouder, A., Silvestre, S., "Automatic Supervision and Fault Detection of PV Systems Based on Power Losses Analysis", Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp. 1929-1937, 2010.
- [34] Vergura, S., Acciani, G., Amoroso, V., Patrono, G. E., Vacca, F., "Descriptive and Inferential Statistics for Supervising and Monitoring the Operation of PV Plants", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, pp. 4456-4464, 2009.
- [35] Hernández, J., Vidal, P., Medina, A., "Characterization of the Insulation and Leakage Currents of PV Generators: Relevance for Human Safety", Renewable Energy, Vol. 35,

- pp. 593-601, 2010.
- [36] SMA, "Capacitive Leakage Currents Information on the Design of Transformerless Inverters of Type Sunny Boy, Sunny Mini Central, Sunny Trpower, Version 2.5", SMA Technical Information, No. Ableitstrom-TI-en-25.
- [37] Takashima, T., Yamaguchi, J., Otani, K., Kato, K., Ishida, M., "Experimental Studies of Failure Detection Methods in PV Module Strings", in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, pp. 2227-2230, 2006.
- [38] Alam, M. K., Khan, F., Johnson, J., Flicker, J., "PV Ground-Fault Detection Using Spread Spectrum Time Domain Reflectometry (SSTDR) ", in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 1015-102, 2013.
- [39] FLIR, "FLIR thermal Image Cameras Brochure", <http://www.flir.com/uploadedFiles/ThermographySA/Products/Product Literature/flir-thermography-family-brochure.pdf>, 2013.
- [40] Kunz, G., Wagner, A., "Internal Series Resistance Determinated of only one IV-Curve Under Illumination", in *19th Photovoltaic Solar Energy Conference Paris*, 2004.
- [41] De Soto, W., Klein, S., Beckman, W., "Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance", *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 78-88, 2006.
- [42] Sridhar, R., Selvan, N. T., Jeevananthan, S., Chowdary, P. S., "Performance Improvement of a Photo Voltaic Array Using MPPT (P&O) Technique", in *Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 191-195, 2010.
- [43] Sabbaghpur Arani, M., Hejazi, M., "The Comprehensive Study of Electrical Faults in PV Arrays", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2016, 2016.
- [44] Fukunaga, K., *Introduction to Statistical Pattern Recognition*: Academic Press, 2013.
- [45] Tang, B., He, H., Baggenstoss, P. M., Kay, S., "A Bayesian Classification Approach Using Class-Specific Features for Text Categorization", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 28, pp. 1602-1606, 2016.
- [46] Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, D. G., *Pattern Classification*: John Wiley & Sons, 2012.
- [47] Deng, Z., Zhu, X., Cheng, D., Zong, M., Zhang, S., "Efficient KNN Classification Algorithm for Big Data", *Neurocomputing*, Vol. 195, pp. 143-148, 2016.