Archive of SID

PSC 2016
سی‌وپنجمین کنفرانس بین‌المللی برق
۳ تا ۵ آبان ماه ۱۳۹۵ / تهران – ایران

No. F-16-PQA-1240

اندازه‌گیری و تحلیل کیفیت توان در نیروگاه خورشیدی ۱۱۰ کیلوواتی الهیه‌ی مشهد در فصول مختلف

حسین غلامی خشت، مجید صنعت‌کار چایجانی، محمد منفرد
دانشگاه فردوسی مشهد
مشهد، ایران
h.gholami@stu.um.ac.ir, majid.sanatkar@stu.um.ac.ir,

مهدی علومی بایگی
شرکت برق منطقه‌ای خراسان
مشهد، ایران
me_oloomi@yahoo.com

چکیده — با توجه به اهمیت و همچنین کمک به توسعه و گسترش استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر، شرکت برق منطقه‌ای خراسان رضوی اقدام به احداث یک نیروگاه خورشیدی ۱۱۰kw در منطقه‌ی الهیه مشهد نموده است. گسترش استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک در کنار مزایای زیادی که ارائه می‌کنند، می‌توانند سبب مشکلات جدی کیفیت توان به‌خصوص در سطح شبکه‌های توزیع بشود. بنابراین اندازه‌گیری و تحلیل کیفیت توان تولیدی این سیستم‌ها امری ضروری می‌باشد، تا در صورت وجود مشکلات کیفیت توان اقدامات اصلاحی لازم صورت بگیرد. در این گزارش به‌منظور بررسی کیفیت توان تولیدی سامانه فتوولتائیک، ولتاژ، جریان و توان تولیدی این سیستم در نقطه‌ی اتصال سیستم فتوولتائیک به شبکه توسط دستگاه Fluke435 و در چهار دوره زمانی یک‌هفته‌ای در تابستان، پاییز و زمستان ۱۳۹۳ و بهار ۱۳۹۴ اندازه‌گیری شده و تحلیلی دقیقی از شاخص‌های کیفیت توان از جمله: هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، بررسی تغییرات دامنه و نامتعادلی ولتاژ و جریان، و همچنین توان اکتیو و راکتیو و انرژی تولیدی سامانه فتوولتائیک ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی — نیروگاه خورشیدی ۱۱۰kW الهیه مشهد؛ تحلیل کیفیت توان؛ سیستم فتوولتائیک؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان

۱. مقدمه

امروزه نیاز به سیستم‌های فتوولتاییک به خوبی در بسیاری از کشورها مطرح شده، به طوری که می‌توان آن را یکی از استراتژی‌ترین فناوری‌های قرن ۲۱ دانست. علت اصلی این امر در دسترس و رایگان بودن، تجدید پذیر بودن و توزیع طبیعی آن است که سبب جلوگیری از صرف هزینه برای انتقال انرژی و تولید برق در محل خواهد شد. در سمت بازار انرژی نیز نگرانی‌ها درمورد امنیت انرژی، انتشار کربن و افزایش آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی، انگیزه‌های بسیاری را برای کشش به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی ایجاد کرده است. حضور تعداد زیادی **PV** متصل به شبکه مشکلاتی را در ارتباط با ایمنی و حفاظت شبکه و قابلیت اطمینان و بویژه کیفیت توان ایجاد می‌کند. ازطرفی وابستگی زندگی مدرن امروزی به تداوم انرژی برق باعث شده که در حوزه سیستم‌های قدرت قابلیت اطمینان و کیفیت توان در بالاترین درجه اهمیت قرار بگیرد. آنچه که در یک نیروگاه خورشیدی هدف نهایی است تولید یک جریان و ولتاژ خروجی با شکل موج سینوسی کامل و مناسب برای تحویل به شبکه می‌باشد، اما در عمل به علت وجود اینورترهای مبدل متصل به سلول، یکنواخت نبودن پخش بار در سیستم، مولفه‌های هارمونیکی در جریان خروجی سلول ظاهر می شوند که با ترکیب با مولفه اصلی جریان و عبور از امپدانس خطوط باعث اعوجاج در شکل ولتاژ شبکه می‌شود. همچنین وجود

www.SID.ir

Archive of SID

بارهای غیرخطی در شبکه که از مولفه‌های هارمونیکی تغذیه می‌کنند کیفیت را به مراتب نامطلوب‌تر می‌سازند.

در این مقاله سعی بر آن است که با انجام اندازه‌گیری‌های لازم در طی فصل‌های مختلف و تحلیل نتایج بتوانیم ازکیفیت توان سیستم آگاهی دقیقی پیدا کنیم تا در گام‌های بعدی بتوان نسبت به حل مشکلات موجود و محدود و کنترل کردن آنها اقدامات لازم صورت گیرد. همچنین این مقاله، اطلاعات لازم برای پروژه‌های عملی آتی که هدف آن‌ها توسعه نیروگاه‌های خورشیدی است را فراهم می‌کند. در نهایت افزایش آگاهی نسبت به اهمیت انرژی‌های تجدید پذیر به ویژه انرژی خورشیدی در توسعه کشور و جلب توجه مدیران، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان برای در نظر گرفتن سهم مناسبی برای انرژی‌های تجدید پذیر در توسعه کشور، یکی دیگر از اهداف اصلی نوشتن این مقاله می‌باشد.

۲. مشخصات فنی نیروگاه فتوولتائیک

نیروگاه خورشیدی الهیه در مشهد شامل ۵۴۰ عدد پانل خورشیدی با توان ۲۰۰ وات می‌باشد که توان خروجی این سیستم به‌طورکلی ۱۰۸kw است. هر ۱۲ عدد پانل روی یک پایه ترکر تک محوره قرار دارند به‌طوری‌که سیستم در مجموع شامل ۴۵ عدد ترکر با توان ۲,۴ kW می‌باشد. برای هر سه ترکر باهم یک اینورتر DC/AC تک فاز در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ مشخصات تجهیزات سامانه فتوولتائیک آورده شده است.

جدول۱: مشخصات تجهیزات سامانه فتوولتائیک

مشخصات	پنل خورشیدی	اینورتر تکفاز
سازنده	آریا سولار	SMA (SMC 7000TL)
توان فردی(کیلووات)	۰,۲	۷
تعداد	۵۴۰	۱۵
توان کل(کیلووات)	۱۰۸	۱۰۵
جریان نامی فردی(آمپر)	**MPP** ۴,۹۹	۳۱ خروجی
ولتاژ نامی(ولت)	**MPP** ۴۰,۰۸	۲۲۰ – ۲۳۰ – ۲۴۰ خروجی

۳.تحلیل و بررسی اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری های عملی از سامانه فتوولتائیک

اندازه‌گیری‌ها در چهار دوره زمانی یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان، پاییز و زمستان سال ۱۳۹۳ و بهار سال ۱۳۹۴ در نقطه اتصال سیستم فتوولتائیک به شبکه (PCC) انجام شده‌اند. علت این امر تحلیل و بررسی دقیق‌تر رفتار نیروگاه فتوولتائیک در طول سال می‌باشد. هرچند که حدود عملکرد حداکثر و حداقل توان تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک با اندازه‌گیری در دو فصل تابستان و زمستان به دست می‌آید. در این مقاله، به دلیل کمبود فضا، بیشتر اطلاعات اندازه‌گیری و تحلیل شده در دو فصل تابستان و زمستان استفاده شده است. در این پروژه اندازه‌گیری‌ها در نقطه‌ی پیوند مشترک توسط دستگاه FLUKE435 هر پنج دقیقه ثبت شده است. این دستگاه امکان نمونه‌برداری همزمان از سیگنال ولتاژ و جریان به‌منظور بررسی شاخص‌های مهم کیفیت توان را فراهم می‌سازد. از طرفی دستگاه مورد نظر قابل تنظیم براساس استانداردهای مختلف از جمله IEC، EN و غیره می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری و نمونه‌برداری اطلاعات توسط دستگاه، نمودارها و الگوهای مربوطه، به‌صورت یک گزارش مکتوب و کامل شامل بررسی شاخص‌های کیفیت توان ارائه شده است. داده‌های ثبت شده از نیروگاه ۱۱۰ کیلوواتی الهیه‌ی مشهد شامل ولتاژ فاز (هارمونیک‌ها و عدم تعادل)، تحلیل هارمونیکی جریان خط، توان اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه و ضریب قدرت می‌باشند.

۳,۱. تحلیل کیفیت ولتاژ نیروگاه فتوولتائیک در نقطه‌ی PCC

مطابق استاندارد صنعت برق ایران، حداکثر تغییرات مجاز بلندمدت ولتاژ باید به افزایش ۵ درصدی و کاهش ۱۰ درصدی حول مقدار نامی محدود شود [۱]. بررسی تغییرات مقدار مؤثر ولتاژ در شکل ۲ حاکی از آن است که تغییرات ولتاژ در هر دو دوره‌ی اندازه‌گیری در فصل‌های تابستان و زمستان زیاد نمی‌باشد، بنابراین حدود مجاز استاندارد صنعت برق ایران به‌خوبی برآورده شده است. نمودارهای THD ولتاژ در دو دوره‌ی اندازه‌گیری در شکل ۳ و نمودار تجمعی THD ولتاژ یکی از فازهای شبکه به همراه شاخص CP95[1]، بر مبنای اطلاعات اندازه‌گیری شده در چهار فصل، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. نمودارهای تجمعی THD ولتاژ حدود ۲,۵ درصد را برای ولتاژ در نقطه‌ی PCC ارائه می‌کنند، بنابراین مشاهده می‌شود که به‌خوبی حد مجاز استاندارد رعایت شده است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که با توجه به اینکه ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک در مقایسه با شبکه‌ی قدرت اتصالی کوچک می‌باشد،

[1] شاخص CP95 در نمودارهای تجمعی نشان دهنده این است که ۹۵ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده کمتر از این مقدار هستند.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱: نیروگاه ۱۱۰ کیلوواتی الهیه‌ی مشهد

THD ولتاژ تأثیر قابل‌توجهی از تغییر توان تولیدی (حضور یا عدم حضور) نیروگاه فتوولتائیک نمی‌پذیرد.

۳,۲. تحلیل هارمونیکی جریان نیروگاه فتوولتائیک در نقطه‌ی PCC

در شکل ۵ مقادیر RMS جریان تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در دو دوره‌ی اندازه‌گیری در تابستان و زمستان نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تفاوت مشاهده شده در مقادیر RMS فازهای مختلف به دلیل استفاده از اینورترهای تک‌فاز می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر نمودارها، درصد نامتعادلی جریان در دو دوره اندازه‌گیری در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. با مشاهده‌ی این شکل ملاحظه می‌شود که درصد نامتعادلی جریان در بار کامل کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در این شکل بخشی از داده‌ها از این حد تجاوز کرده‌اند که به دلیل پایین بودن سطح توان تولیدی خروجی و دامنه جریان دارای اهمیت نمی‌باشند.

ذکر این نکته، برای محاسبه‌ی اعوجاج هارمونیکی جریان، قابل‌توجه است که چون هارمونیک‌های جریان در مقابل تغییرات تابش حساسیت بیشتری نسبت به هارمونیک‌های ولتاژ دارند. بنابراین زمانی که سطح تولید نیروگاه فتوولتائیک بالا است (جریان مؤلفه‌ی اصلی زیاد است) THD جریان نوسان زیادی ندارد و به‌خوبی حدود استاندارد توانیر را برآورده می‌کند. در مقابل در بازه زمانی‌ای که میزان تابش و تولید پایین است، میزان THD افزایش قابل‌ملاحظه‌ای دارد، ولی چون در این مواقع مقدار مؤلفه اصلی جریان کوچک است، نگرانی از بابت بالا بودن THD وجود ندارد. یکی از دلایل اصلی درصد بالای هارمونیک‌های جریان در توان خروجی کم ناشی از ناتوانی مدار کنترل و حسگرهای اینورتر برای اندازه‌گیری و حفظ شکل موج سینوسی جریان خروجی می‌باشد. همچنین پروب‌های مورد استفاده برای ثبت داده‌های جریان تیم تحقیق نیز دارای خطای اندازه‌گیری قابل‌ملاحظه‌ای در جریان‌های خیلی کم می‌باشد. در این شرایط پیشنهاد می‌گردد از شاخص TDD[۲] استفاده شود. این کمیت طبق تعریف برابر است با جذر مجموع مجذور هارمونیک‌های جریان که به‌صورت درصدی از ماکزیمم جریان بار بیان می‌شود.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{n} I_h^{\,2}}}{I_L} \qquad (۱)$$

نمودارهای TDD جریان در دو فصل تابستان و زمستان در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودار تجمعی TDD جریان در شکل ۸ رسم شده است که TDD = 2.27% را برای جریان تولیدی نیروگاه تأیید می‌کند، بنابراین حدود مجاز استاندارد توسط نیروگاه فتوولتائیک به‌خوبی رعایت شده است.

همچنین ذکر این نکته قابل‌توجه است که طبق اطلاعات مندرج در برگه مشخصات فنی اینورتر موجود، در شرایطی که اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ کمتر از ۲٪ و توان خروجی اینورتر بیشتر از ۵۰٪ توان نامی باشد، هارمونیک جریان تولیدی اینورتر کمتر از ۳٪ خواهد بود که با توجه به تحلیل هارمونیکی ارائه شده در این بخش این حد برای هارمونیک جریان تولیدی اینورتر به‌خوبی برآورده شده است.

[2] Total root-sum-square harmonic current distortion

www.SID.ir

Archive of SID

درنهایت باوجود اینکه اینورتر مورد استفاده در این سامانه از نوع بدون ترانسفورماتور می‌باشد، اما داده‌های ثبت شده حاکی از آن است که میزان جریان DC تزریقی از سمت مولد فتوولتائیک به شبکه بسیار نزدیک به صفر می‌باشد.

۳,۳. توان اکتیو و راکتیو و انرژی تولیدی و ضریب توان نیروگاه فتوولتائیک

نمودار توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی سیستم فتوولتائیک برحسب کیلووات و کیلووار در یک دوره یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. میزان توان تولیدی سامانه فتوولتائیک متأثر از دو عامل شدت تابش خورشید و دمای هوا دارای نوسان می‌باشد. هرچه شدت تابش بیشتر و دما کمتر باشد، توان تولیدی نیروگاه فتوولتائیک بیشتر خواهد بود. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نیروگاه فتوولتائیک در تابستان در ساعات بیشتری از روز حدود توان نامی خود را تولید می‌کند. بنابراین همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در این فصل در بیشترین مقدار خود قرار دارد. همچنین ذکر این نکته قابل‌توجه است که در زمستان پیک توان تولیدی از فصول دیگر بیشتر می‌باشد (حدود ۱۰۰ کیلووات) که دلیل آن زاویه پنل‌ها و دمای در طول روز کمتر این فصل نسبت به سایر فصل‌ها می‌باشد. همچنین نوسانات بالای توان در فصل زمستان هم ناشی از هوای ابری و بارانی در طول دوره‌ی اندازه‌گیری می‌باشد.

در IEC 61727 برای ضریب توان میانگین شرایطی تعیین شده است که طبق تعریف استاندارد مربوطه در شرایط خروجی بزرگ‌تر از ۵۰٪ توان نامی اینورتر، سیستم فتوولتائیک باید ضریب توانی بزرگ‌تر از ۰,۹ پسفاز داشته باشد. در شکل ۱۲ ضریب توان میانگین در دوره‌های مختلف اندازه‌گیری در نقطه‌ی PCC نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که در طول روز که توان تولیدی نیروگاه شرایط استاندارد را برآورده می‌کند، قیود ضریب توان به‌خوبی برآورده شده است.

۴.جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور بررسی کیفیت توان تولیدی سامانه فتوولتائیک ۱۱۰kW الهیه مشهد، ولتاژ، جریان و توان تولیدی این سیستم در نقطه‌ی اتصال سیستم فتوولتائیک به شبکه توسط دستگاه Fluke435 و در چهار دوره زمانی یک‌هفته‌ای در تابستان، پاییز و زمستان ۹۳ و بهار ۹۴ اندازه‌گیری شد و تحلیلی دقیقی از شاخص‌های کیفیت توان از جمله: هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، بررسی تغییرات دامنه و نامتعادلی ولتاژ و جریان و همچنین توان اکتیو و راکتیو و انرژی تولیدی سامانه فتوولتائیک ارائه شد.

براساس تحلیل‌های ارائه شده در این مقاله، نمودار تجمعی TDD جریان رقم ۲,۲۷ درصدی را برای TDD جریان تولیدی نیروگاه ارائه می‌کند که تأییدی بر رعایت حدود مجاز استاندارد توسط نیروگاه فتوولتائیک می‌باشد. در مقابل مقداری نامتعادلی در جریان تولیدی نیروگاه وجود دارد که ناشی از استفاده از اینورترهای تکفاز می‌باشد.

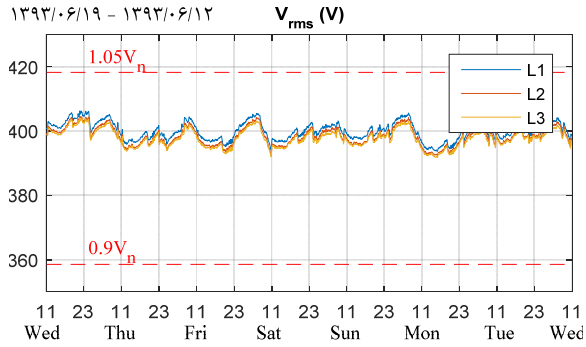
نیروگاه فتوولتائیک در تابستان در ساعات بیشتری از روز حدود توان نامی خود را تولید می‌کند. بنابراین، انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در این فصل در بیشترین مقدار خود قرار دارد. همچنین پیک توان تولیدی در زمستان بیشتر می‌باشد که دلیل آن زاویه پنل‌ها و دمای در طول روز کمتر این فصل نسبت به تابستان می‌باشد.

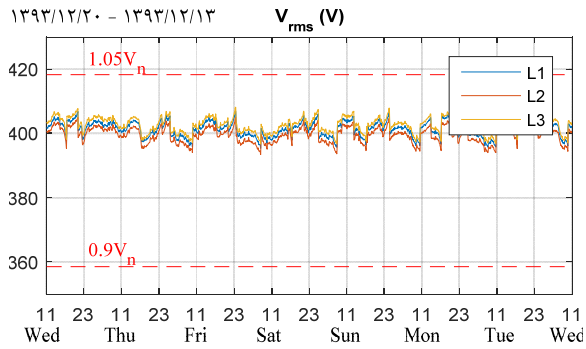
چون در سیستم تحت بررسی ظرفیت سیستم فتوولتائیک در برابر شبکه‌ی قدرت بسیار کوچک می‌باشد و بار غیرخطی قابل ملاحظه در نقطه‌ی PCC وجود ندارد، شاخص‌های کیفیت ولتاژ (از جمله THD، تغییرات RMS، نامتعادلی) بیشتر متأثر از تغییرات خود شبکه قدرت می‌باشند و نیروگاه فتوولتائیک بر این شاخص‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. اما برای بررسی و تحلیل ولتاژ شبکه در نقطه‌ی PCC این شاخص‌ها اندازه‌گیری و تحلیل شدند. براساس نتایج ارائه شده در این مقاله، THD ولتاژ در PCC حدود ۲,۵ درصد می‌باشد که عدد قابل قبولی است. همچنین تغییرات در RMS ولتاژ بسیار ناچیز می‌باشد.

در نهایت توصیه اکید می‌شود که مطالعات مشابهی بر روی سایر سامانه‌های فتوولتائیک که از اینورترهای متفاوتی (به‌خصوص محصولات شرکت‌های نه چندان معتبر) استفاده می‌کنند انجام شده و از نتایج موفق پروژه اخیر، برای مقایسه و ارزیابی عملکرد کیفیت توان آن‌ها استفاده شود.

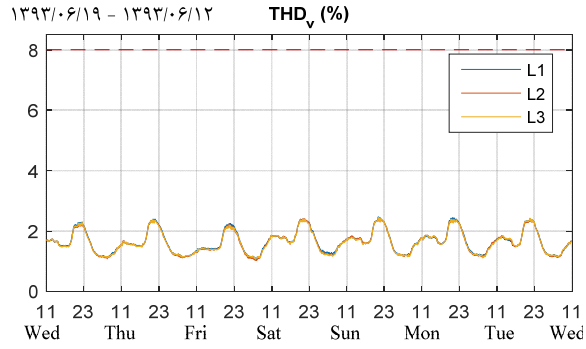
www.SID.ir

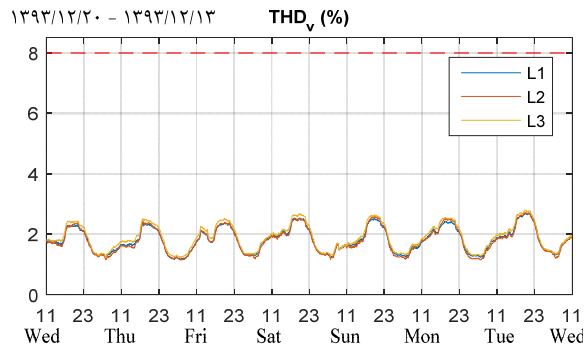
Archive of SID



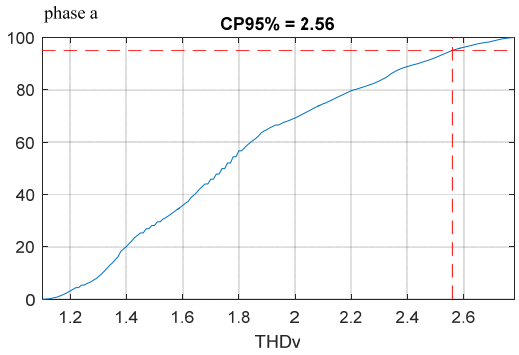


شکل ۲: تغییرات مقدار مؤثر ولتاژ در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل-های تابستان و زمستان (و حدود مجاز)

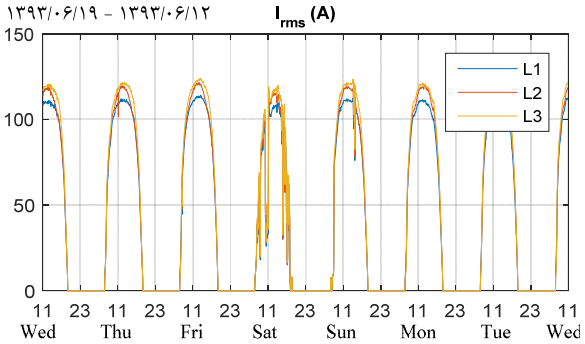


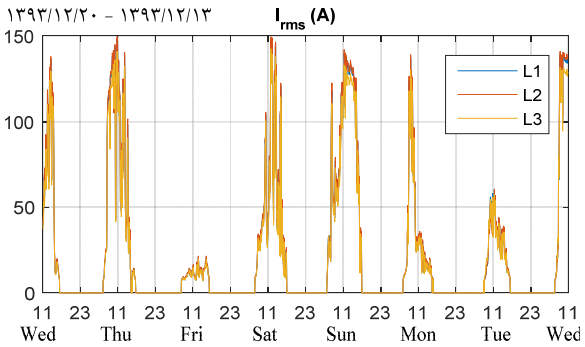


شکل ۳: THD ولتاژ در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان (و حدود مجاز)

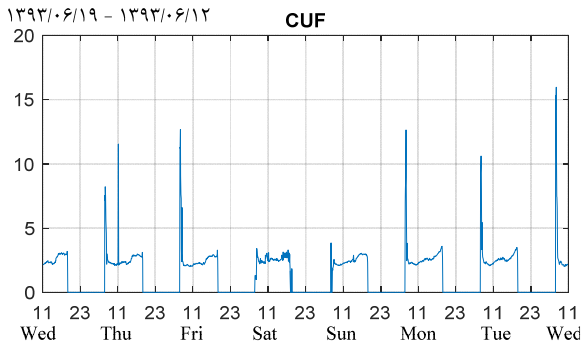


شکل ۴: نمودار تجمعی THD ولتاژ یکی از فازهای شبکه حاصل از داده‌های چهار دوره‌ی اندازه‌گیری



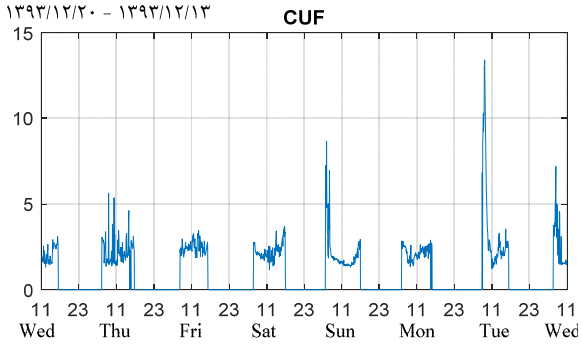


شکل ۵: تغییرات مقدار مؤثر جریان در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصول تابستان و زمستان (و حدود مجاز)

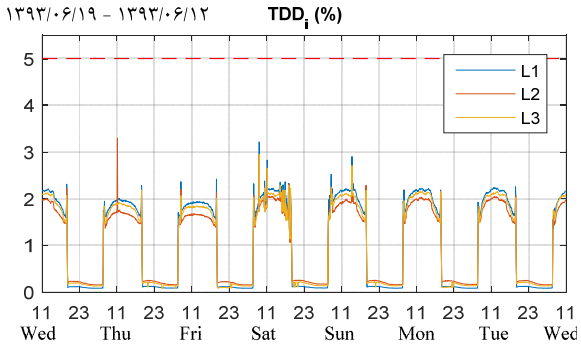


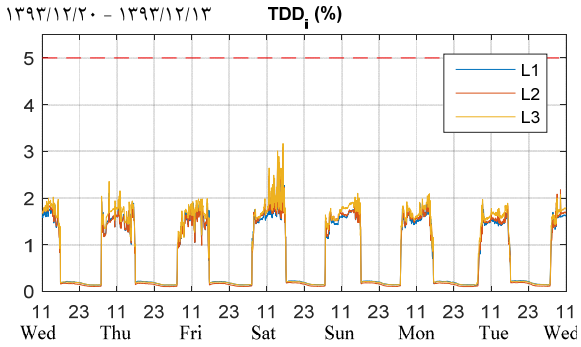
www.SID.ir

Archive of SID

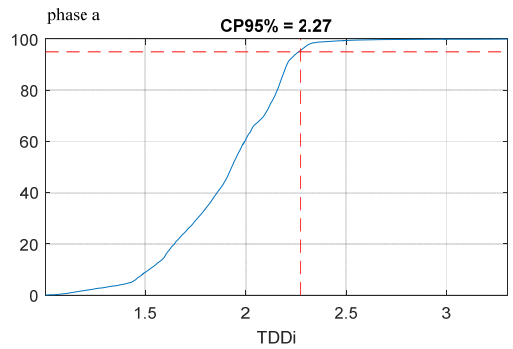


شکل ۶: درصد نامتعادلی جریان در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل-های تابستان و زمستان

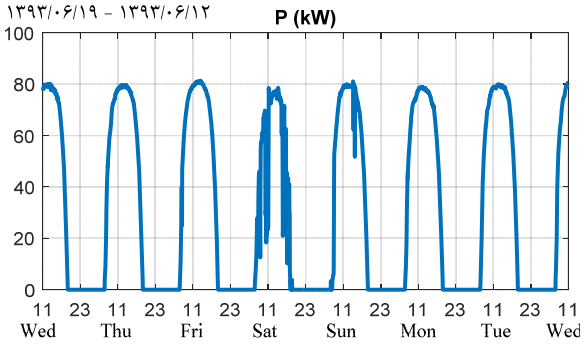


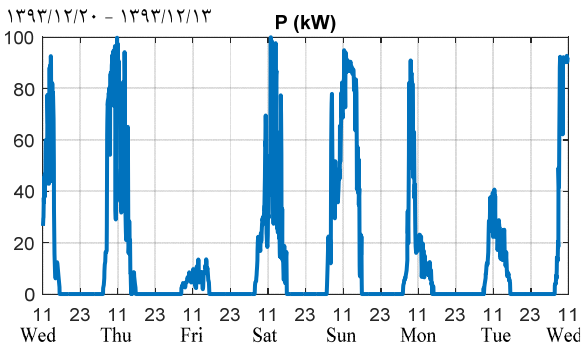


شکل ۷: TDD جریان در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان (و حدود مجاز)

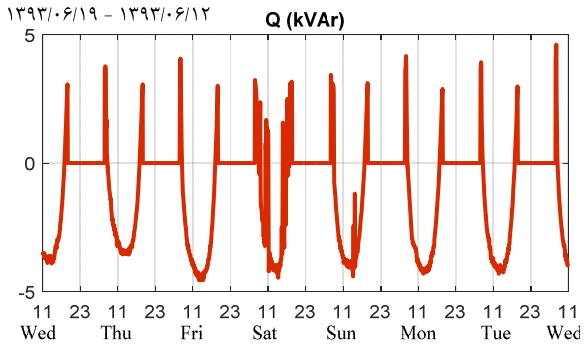


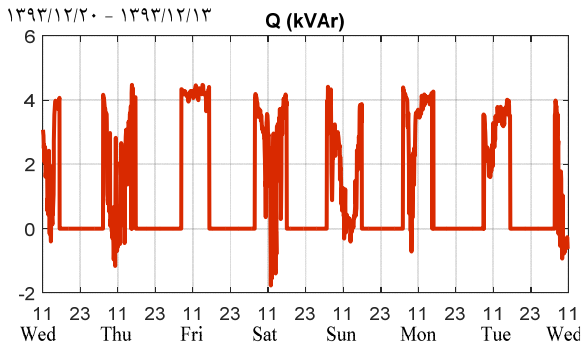
شکل ۸: نمودار تجمعی TDD جریان یک فاز نیروگاه حاصل از داده‌های چهار دوره‌ی اندازه‌گیری





شکل ۹: توان اکتیو تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان

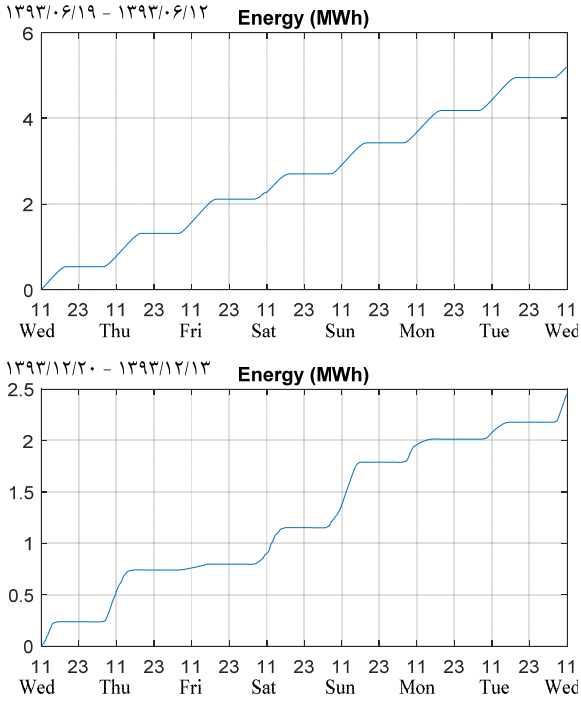




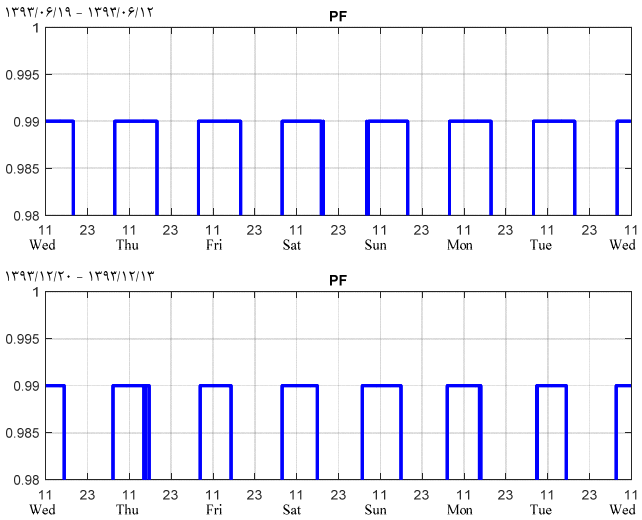
شکل ۱۰: توان راکتیو تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱: انرژی تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان



شکل ۱۲: ضریب توان نیروگاه فتوولتائیک در دوره‌های اندازه‌گیری یک‌هفته‌ای در فصل‌های تابستان و زمستان

۵.مراجع

[۱] استاندارد صنعت برق ایران – مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق) – قسمت دوم حدود مجاز هارمونیک‌ها – ۱۳۸۱

[۲] استاندارد صنعت برق ایران – مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق) – قسمت چهارم تغییرات ولتاژ و فرکانس – ۱۳۸۱

[۳] استاندارد صنعت برق ایران – مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق) – کیفیت برق تحویلی به انواع مشترکین ۱۱۸۵۹, ۱۳۸۱

[۴] دستورالعمل بهره‌برداری از مولدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع برق ,شرکت توانیر – ۱۳۸۸.

[5] IEEE Std 1547-2003, Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE, June 2003. ISBN 0-7381-3720-0 SH95144.

[6] IEC 61727 Ed. 2, Photovoltaic (PV) Systems – Characteristics of the Utility Interface, December 2004

[7] Standard EN 50160, Voltage Characteristics of Public Distribution System, CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium, November 1999.

[8] IEEE, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159-1995., in: IEEE Standard 1159, 1995.

www.SID.ir