

## ارزیابی توانایی نیروگاه های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر برای ارائه خدمات جانبی در سیستم برق تجدیدساختار شده کالیفرنیا

محمد اکبرزاده

دانشجو دکتری مهندسی برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

حسن براتی\*

دانشیار گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

### چکیده

تنوع منابع انرژی تجدیدپذیر، به ویژه انرژی باد و خورشید، به عنوان راه حلی کلیدی برای کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در سیستم برق کالیفرنیا مطرح شده است. افزایش سریع تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر روش های مدیریت شبکه توسط اپراتورهای سیستم را تغییر داده است. این مقاله به بررسی تأثیرات تولید برق از منابع تجدیدپذیر بر پایداری فرکانسی و ولتاژ در شبکه برق این ایالت می پردازد. از آنجایی که این منابع به طور طبیعی ناپایدار هستند، چالش های جدیدی در مدیریت بار و همخوانی منابع برق به وجود می آید. در این راستا، اهمیت خدمات جانبی در حفظ پایداری سیستم به تفصیل مورد بحث قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که استفاده موثر از فناوری های نوین و به کارگیری راهکارهای هوشمند در مدیریت شبکه، می تواند به افزایش قابلیت اطمینان و پایداری سیستم کمک کند. با توجه به پتانسیل بالای انرژی های تجدیدپذیر در کالیفرنیا، تحقیق حاضر به دنبال ارائه راهکارهایی برای تحقق یک سیستم برق پایدار و کارآمد می باشد.

واژگان کلیدی: تجدیدساختار، شبکه برق کالیفرنیا، منابع انرژی تجدیدپذیر، خدمات جانبی

## ۱- مقدمه

در سال های اخیر افزایش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به ویژه انرژی باد و خورشید، به عنوان یکی از اصلی ترین راه حل ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش وابستگی به منابع فسیلی، مورد توجه قرار گرفته است. ایالت کالیفرنیا، به دلیل برخورداری از منابع طبیعی مناسب و سیاست های حمایتی قوی، در صدر تولید انرژی های تجدیدپذیر در ایالات متحده قرار دارد. شرکت بهره بردار شبکه برق کالیفرنیا <sup>۱</sup> (CAISO) و کمیسیون خدمات انرژی کالیفرنیا <sup>۲</sup> (CEC) به عنوان نهادهای مرکزی در این حوزه، نقش بسزایی در برنامه ریزی و مدیریت این تحول انرژی دارند. براساس گزارش های CAISO، کالیفرنیا توانسته است در سال های اخیر به طور مداوم سهم انرژی های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی خود را افزایش دهد. تولید برق از منابع تجدیدپذیر، به ویژه برق تولیدی از انرژی باد و خورشید، به طور مستقیم بر شبکه برق تاثیر می گذارد. برخلاف نیروگاه های سنتی که قابلیت تولید پایدار و پیش بینی پذیر دارند، منابع تجدیدپذیر به دلیل وابستگی به شرایط جوی، نوسان پذیر هستند. این نوسانات می توانند تاثیرات زیادی بر پایداری فرکانسی و ولتاژ در شبکه داشته باشند. افزایش میزان ورود برق حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه، نیازمند مدیریت دقیق و راهکارهای نوین برای حفظ پایداری شبکه است. یکی از چالش های کلیدی که با افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در شبکه برق به وجود می آید، مربوط به حفظ پایداری فرکانسی و ولتاژ است. منابع تجدیدپذیر به دلیل نوسانات طبیعی خود، این چالش را تشدید می کنند. در این راستا، خدمات جانبی شبکه مانند کنترل فرکانس و کنترل توان راکتیو، نقش حیاتی در حفظ پایداری شبکه دارند. یکی دیگر از جوانب مهم این تحول انرژی، تاثیرات اجتماعی و اقتصادی آن است. استفاده از انرژی های تجدیدپذیر نه تنها باعث کاهش هزینه های مصرف سوخت های فسیلی می شود، بلکه زمینه ساز ایجاد فرصت های شغلی جدید در بخش های مرتبط با تولید و مدیریت انرژی تجدیدپذیر است. با توجه به روندهای پیش رو، انتظار می رود که استفاده از منابع تجدیدپذیر به ویژه باد و خورشید، همچنان در محوریت توسعه انرژی در کالیفرنیا باقی بماند. تحقیقات علمی و فناوری های نوین در این زمینه باید همگام با رشد تقاضا و توسعه شبکه، پیش برود. این امر نیازمند همکاری مستمر میان بخش های مختلف از جمله بخش دولتی، بخش خصوصی و مؤسسات علمی است. براساس سناریوهای پیش بینی شده توسط CAISO، با افزایش پیوسته سهم انرژی های تجدیدپذیر، می توان به کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه ای و بهبود کیفیت محیط زیست دست یافت.

کالیفرنیا به عنوان ایالت پیشرو در ایالات متحده در استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، الزامات قانونی و سیاست های حمایتی جامعی را برای توسعه این منابع تنظیم کرده است. قانون <sup>۳</sup> (RPS) ایالت، الزامات سختی برای تولید انرژی های تجدیدپذیر وضع کرده است. به طور خاص، RPS هدف گذاری کرده است که تا سال ۲۰۴۵، ۱۰۰٪ از برق مصرفی کالیفرنیا از منابع تجدیدپذیر تامین شود. کمیسیون خدمات انرژی کالیفرنیا (CEC) در هماهنگی با CAISO، مسئول نظارت بر اجرای این قوانین است. تحقق این اهداف قانونی، مستلزم تدوین و اجرای راهبردهای جامع در سیستم شبکه برق است. این راهبردها شامل بهینه سازی شبکه انتقال و توزیع برق، ارتقاء فناوری های مدیریت شبکه و توسعه زیرساخت های لازم برای ذخیره سازی انرژی است. گزارش های اخیر CEC نشان می دهد که توسعه پروژه ها در مقیاس بزرگ باتری سازی و استفاده از سیستم های کنترل هوشمند انرژی، می تواند به صورت قابل توجهی به پایداری شبکه کمک کند. پایداری شبکه برق کالیفرنیا هم به

<sup>1</sup> . California Independent System Operator

<sup>2</sup> . California Energy Commission

<sup>3</sup> . Renewable Portfolio Standard

مسئله‌ای تکنیکی و هم به مسئله‌ای مدیریتی تبدیل خواهد شد. اصلاحات زیرساختی، توسعه فناوری‌های پیشرفته و ایجاد چارچوب‌های قانونی مناسب، ابزارهای کلیدی برای مواجهه با چالش‌های آینده هستند. این مقاله با هدف ارائه تحلیلی از تأثیرات تولید برق از منابع تجدیدپذیر و نقش ارائه خدمات جانبی توسط آنها بر پایداری فرکانسی و ولتاژ و سیاست‌های مؤثر در این زمینه می‌پردازد (California Annual Report, 2021).

## ۲- تجدیدساختار در صنعت برق کالیفرنیا

صنعت برق ایالت کالیفرنیا شامل بخش‌های تولید، انتقال و توزیع می‌باشد. صنعت برق از منابع متنوعی همچون زغال سنگ، گاز طبیعی و دیگر منابع انرژی جهت تولید برق استفاده می‌کند. در گذشته شرکت سنتی یکپارچه عمودی تمام فعالیت‌ها از تولید برق گرفته تا انتقال آن از طریق سیم‌های فشار قوی و توزیع به مشتریان را انجام می‌دادند. مرحله اول تجدید ساختار شامل تجزیه شرکت‌های برق انحصاری بود، سیاست‌گذاران به دنبال ایجاد فرصت‌ها با در نظر گرفتن بازار رقابتی برای برق بوده‌اند. علاقه طبیعی کالیفرنیا به رهبری این ایالت در تجدید ساختار انرژی با کاهش رشد اقتصادی در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ افزایش یافت. این ایالت در دوران پس از جنگ سرد به دلیل قیمت غیررقابتی انرژی در مقایسه با ایالت‌های همسایه با مشکل جذب صنایع جدید مواجه بود. در سال ۱۹۹۶، زمانی که قانون AB 1890 تصویب شد، هزینه برق کالیفرنیا تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از میانگین ملی بود و کاهش نرخ هزینه برق برای همه طبقات، محرک اصلی این قانون بود. این قانون، کاهش فوری ۱۰٪ و وعده کاهش کلی ۲۰٪ در نرخ‌ها تا سال ۲۰۰۲ است. حتی با کاهش وعده داده شده در قانون AB 1890، ایالت همچنان قیمت‌های پایه بالاتری خواهد داشت، تجدیدساختار همچنین امید به پدیدار شدن بسیاری از محصولات و ارائه دهندگان برق جدید را فراهم می‌کند و گزینه‌های هدفمندتری را برای مصرف کنندگان و مشاغل فراهم می‌کند. در سال ۲۰۰۰، بحث درباره تنوع منابع سوخت به دلیل افزایش قیمت گاز طبیعی در سیاست انرژی آمریکا مورد توجه قرار گرفت و تمام نیروگاه‌های نسل جدید در کالیفرنیا برای ساخت باید به عنوان بخشی از تلاش‌های کلی برای انطباق با استانداردهای انتشار آلاینده‌ها EPA<sup>1</sup> باشند (Horiuchi, 2001).

حرکت شرکت‌های تولید برق در کالیفرنیا به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به واسطه چندین الزام قانونی ملی و ایالتی شکل گرفته است. این الزامات شامل قوانین، مقررات و برنامه‌های تشویقی مختلف است که توسط دولت فدرال و ایالت کالیفرنیا تصویب و اجرایی شده است. قانون فدرال هوای پاک که در سال ۱۹۷۰ به تصویب رسید، هدف آن بهبود کیفیت هوا و کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید انرژی است. این قانون به ایالت‌ها اجازه می‌دهد تا استانداردهای سخت‌تری برای تنظیم انتشار گازهای گلخانه‌ای تعیین کنند. قانون کاهش تغییرات اقلیمی به منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی در سطح ملی تصویب شده است که شرکت‌های تولید برق را مجبور به استفاده از منابع پاک‌تر می‌کند. قانون ایالتی انرژی پایدار کالیفرنیا در سال ۲۰۰۲ به تصویب رسید، هدف آن افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق کالیفرنیا است. بر اساس این قانون، شرکت‌ها ملزم به تولید و تأمین حداقل ۲۰ درصد از برق خود از منابع تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۰ و ۶۰ درصد در سال ۲۰۳۰ هستند که این درصد به تدریج افزایش می‌یابد. قانون ایالتی کاهش گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۰۶ به تصویب رسید، هدف آن کاهش ۲۵ درصدی گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۲۰ به نسبت سطوح ۱۹۹۰ می‌باشد. این هدف تشویق به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود بهره‌وری انرژی را تسریع می‌کند. دولت کالیفرنیا و دولت فدرال برنامه‌های مختلفی

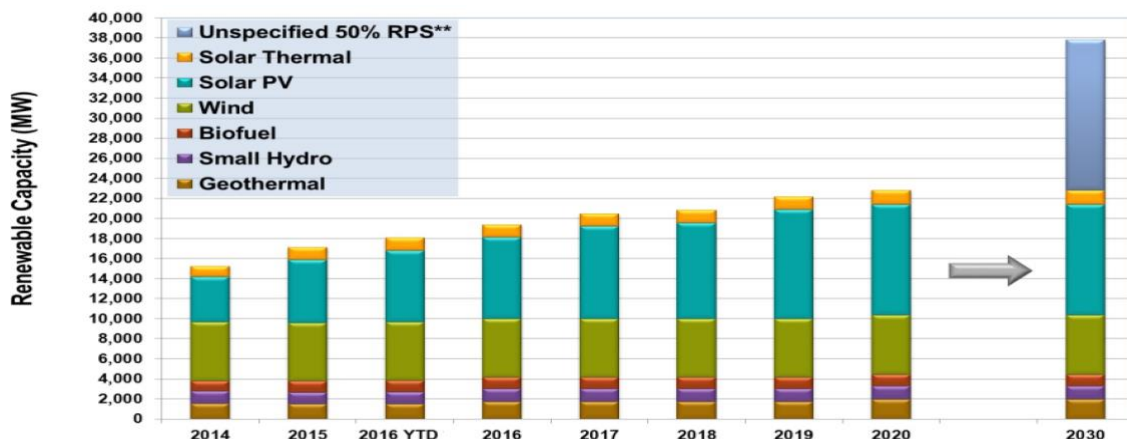
<sup>1</sup> . Environmental Protection Agency

برای ارائه اعتبار مالیاتی به پروژه های انرژی های تجدیدپذیر دارند. این برنامه ها به شرکت های تولید برق کمک می کند تا به سرمایه گذاری در تکنولوژی های نوین و تجدیدپذیر ترغیب شوند. کالیفرنیا همچنین اهداف بلندمدتی برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر تعیین کرده است. به طور مثال، هدف گذاری بر روی ۱۰۰٪ برق تجدیدپذیر تا سال ۲۰۴۵ یکی از اهداف کلیدی قانون گذاری این ایالت است. با توجه به الزامات قانونی ملی و ایالتی، شرکت های تولید برق در کالیفرنیا ناچار به تغییر و تحول رویه های خود در تولید انرژی هستند تا به استانداردهای جدید و اهداف زیست محیطی دست یابند. این الزامات نه تنها به نفع محیط زیست است، بلکه می تواند به ایجاد فرصت های اقتصادی جدید و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی نیز منجر شود (Bartridge et al, 2021).

رشد سریع تولید برق از انرژی های تجدیدپذیر در این ایالت بخاطر سیاست های حمایتی موجود چشمگیر بوده است. کالیفرنیا به عنوان یکی از پیشروان در استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و سیاست های سختگیرانه در ایالات متحده شناخته می شود. این ایالت دارای بزرگترین ظرفیت نصب شده خورشیدی و بزرگترین بازار انرژی تجدیدپذیر در ایالات متحده می باشد و هدف های بلند پروازانه ای برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای دارد. شبکه برق کالیفرنیا پیشرفته و پیچیده است و شامل سیستم های مدیریت هوشمند شبکه می باشد. شبکه برق این ایالت به شبکه سراسری برق متصل است و از این اتصال برای تبادل برق با سایر ایالات ها استفاده می کند. صنعت برق کالیفرنیا در حال تجربه تحولات چشمگیری به جهت استفاده گسترده از منابع تجدیدپذیر است و در حال مواجه با چالش های مختلفی می باشد و تلاش های گسترده برای بهبود بهره وری، امنیت، پایداری و انعطاف پذیری شبکه انجام شده است.

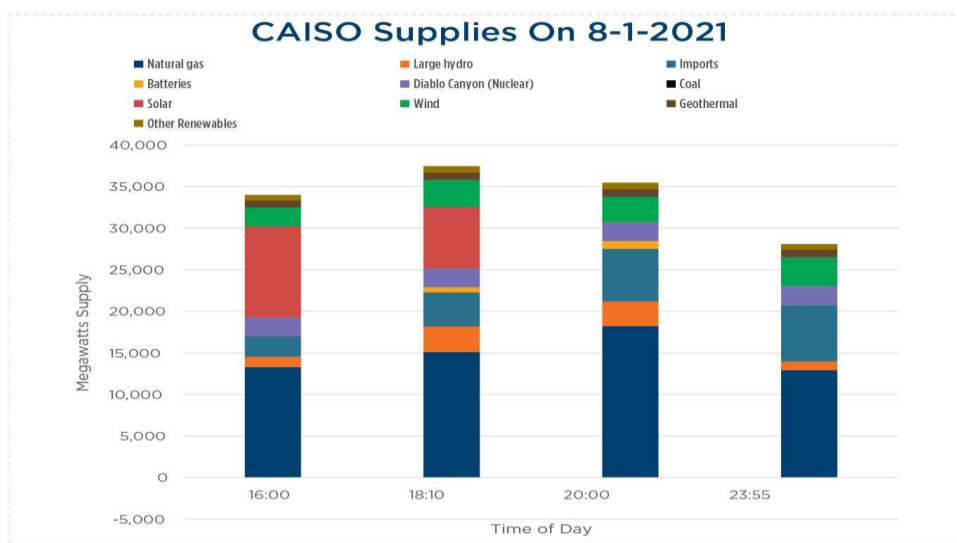
### ۳- استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در شبکه برق کالیفرنیا (پنل های خورشیدی)

تا پایان سال ۲۰۱۵، ایالات متحده دارای ۲۵ گیگاوات (GW) ظرفیت انرژی خورشیدی نصب شده در کشور است (Munsell, 2016). انرژی های تجدیدپذیر در ایالات متحده ۱۳/۴۴ درصد از برق تولیدی داخلی را در سال ۲۰۱۵ به خود اختصاص داده است (Energy Information, 2016). کالیفرنیا یک ایالت پیشرو برای یکپارچه سازی منابع تجدیدپذیر است، حدود ۲۹ درصد از برق کالیفرنیا از منابع تجدیدپذیر واجد شرایط RPS (از جمله نیروگاه های آبی کوچک) تامین می شود (CPUC, 2013). کالیفرنیا همچنین در سیاست های تغییرات آب و هوایی پیشرو است که هدف آن کاهش انتشار گازهای گلخانه ای از همه بخش ها، از جمله صنعت برق تا ۴۰ درصد از سطوح سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۳۰ و ۸۰ درصد از سطوح سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۵۰ است. قابلیت اطمینان شبکه، همه منابع، از جمله انرژی های تجدیدپذیر، باید برای ارائه خدمات قابل اطمینان ضروری مورد استفاده قرار گیرند. مطابق با شکل ۱، CAISO برای رسیدن به ۳۳ درصد RPS خود از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰، انتظار ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ مگاوات خورشیدی اضافی را داشته است. CAISO در سال ۲۰۲۰ بیش از ۹۰۰۰ مگاوات منابع خورشیدی متصل به شبکه را در محدوده عملیاتی خود دارد. از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰، برای رسیدن به ۵۰ درصد RPS، CAISO انتظار ۱۵۰۰۰ مگاوات اضافی منابع تجدیدپذیر را دارد و پیش بینی می شود که بخش قابل توجهی از منابع خورشیدی به دلیل کاهش در قیمت پنل های خورشیدی باشد. بنابراین، توانایی منابع خورشیدی برای ارائه خدمات قابل اطمینان ضروری برای دستیابی به یک شبکه کم کربن ضروری است (CAISO, 2021).

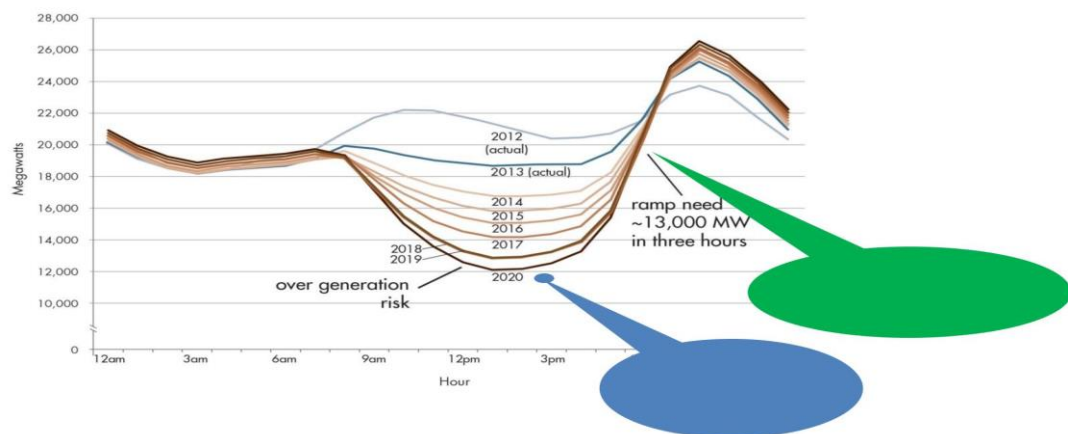


شکل ۱- ظرفیت مورد انتظار برای انرژی های تجدیدپذیر تا پایان سال ۲۰۳۰ (CAISO, 2021)

در شکل ۲ نمونه ای از چگونگی تغییر ترکیب منابع در سیستم برق کالیفرنیا با کاهش مولفه عرضه خورشیدی در ۱ اوت ۲۰۲۱ نشان داده شده است. با کاهش عرضه خورشیدی (نوار زرد) بین ساعت ۱۶ و ساعت ۲۰، تولید مولدهای گاز طبیعی (آبی تیره)، مولدهای آبی (نارنجی) و واردات توان (خاکستری) همگی برای جبران کاهش انرژی خورشیدی افزایش یافتند.

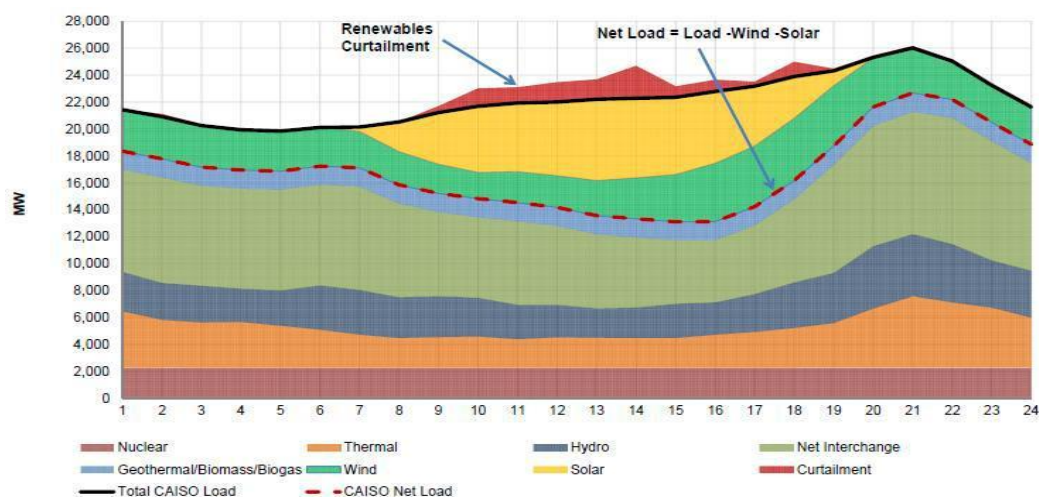


شکل ۲- ترکیب منابع ISO کالیفرنیا در حال کاهش تولید خورشیدی در ۱ اوت ۲۰۲۱ (CAISO, 2021)



شکل ۳- نمودار اردک (CAISO, 2021)

سطوح بالای تولید خورشیدی در ساعات میانی روز در حال حاضر به مازاد عرضه کمک می کند، بنابراین منابع تجدیدپذیر می توانند خدمات قابل اطمینان ضروری را که به طور سنتی توسط منابع متعارف ارائه می شود، ارائه دهند. تغییرات شدید در مصرف در ساعات بعد از ظهر و عصر اتفاق می افتد. این امر به ویژه در ماه های بهار و پاییز که بارها نسبتاً سبک هستند و نفوذ ساعتی انرژی های تجدیدپذیر زیاد است، مشهود است. همانطور که در نمودار اردک در شکل ۳ نشان داده شده، CAISO این تغییرات و فرصت ها را برای یک روز معمولی بهاری به تصویر می کشد که در آن افت قابل توجهی در بار خالص در اواسط روز به دلیل اثر انرژی خورشیدی در سیستم افزایش می باشد. تغییرات و فرصت ها برای استفاده از قابلیت این منابع جدید با سرعتی سریع در حال رشد هستند.



شکل ۴- تفکیک تولید CAISO برای ۲۴ آوریل ۲۰۱۶ (CAISO, 2021)



به دلیل بار خالص کم، خطر مازاد عرضه افزایش می یابد، بنابراین سطوح قابل توجهی از کاهش انرژی های تجدیدپذیر در روزهای خاصی از بهار ۲۰۱۶ اتفاق افتاد. نمونه ای از چنین دوره کاهشی در شکل ۴ نشان داده شده است. در طول ساعات مشخصی از روز در ۲۴ آوریل ۲۰۱۶، بیش از ۲ گیگاوات از تولید انرژی های تجدیدپذیر برای حفظ عملکرد قابل اعتماد سیستم باید محدود می شد. با افزایش دفعات کاهش، فرصت بیشتری ایجاد می شود که صنعت بتواند از قابلیت کنترل منابع تجدیدپذیر استفاده کند و در نتیجه استفاده از این منابع برای چنین خدماتی را گسترش دهد.

CAISO به طور مستمر در حال تطبیق شیوه های عملیاتی و مکانیسم های بازار خود است تا ادغام تولید انرژی های تجدیدپذیر متغیر با رشد سریع را قابل اعتماد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه کند. در سال ۲۰۱۲، گروه یکپارچه سازی تولید متغیر (NERC)<sup>۱</sup> در آمریکای شمالی، الزامات متعددی را برای ژنراتورهای متغیر (از جمله خورشیدی) ارائه کرد تا سهم خود را از پشتیبانی شبکه، از جمله قابلیت های کنترل توان اکتیو، تعیین کنند (CAISO, 2013) و (Reliability Corporation, 2012). این توصیه ها نیازمندی های شبکه مانند کنترل فرکانس و تنظیم توان اکتیو، کنترل ولتاژ و تنظیم توان راکتیو، و معیارهای پاسخ فرکانس را در زمینه ویژگی های فنی و قابلیت های فیزیکی تجهیزات تولید متغیر بیان می کنند. در سال ۲۰۱۵، کارگروه NERC در خدمات قابلیت اطمینان اساسی گزارشی را منتشر کرد که در آن اقدامات جهت گیری مهمی را برای کمک به بخش انرژی برای درک و آمادگی برای افزایش استقرار تولید از منابع تجدیدپذیر منتشر کرد (NERC, 2015). بر اساس این گزارش، برای حفظ سطح مناسبی از قابلیت اطمینان از طریق این انتقال، منابع تولید باید کنترل ولتاژ کافی، پشتیبانی فرکانس ضروری یک سیستم قدرت را فراهم کنند. قانونگذار ایالتی کالیفرنیا لایحه ۳۵۰ سنا را در پاییز ۲۰۱۵ تصویب کرد که بر اساس آن تمام شرکت های برق در این ایالت ملزم به تولید ۵۰ درصد از فروش برق خود از منابع تجدیدپذیر با هدف کاهش انتشار کربن هستند. برای دستیابی به هدف ۵۰ درصد، اپراتورهای برق کالیفرنیا باید راه های بیشتری برای ایجاد تعادل بین تولید و بار بیابند تا اثر افزایش تولید انرژی های تجدیدپذیر و انعطاف پذیری شبکه را مدیریت کنند تا قابلیت اطمینان شبکه حفظ شود. از آنجایی که تولید توان بادی و خورشیدی را می توان افزایش و کاهش داد، کاهش تولید می تواند منبع مفیدی برای کاهش عرضه بیش از حد، تنظیم فرکانس و پاسخ های فرکانسی باشد. در ترکیب با قانون ذخیره انرژی ۱/۳ گیگاواتی کالیفرنیا، خدمات جانبی ارائه شده توسط انرژی های تجدیدپذیر می تواند انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داده و نیاز به ذخیره چرخان را کاهش دهد. این قابلیت ها از منابع تجدیدپذیر برای دستیابی به هدف یک شبکه انعطاف پذیر و قابل اعتماد کم کربن کمک می کند.

#### ۴- ارزیابی قابلیت منابع انرژی تجدیدپذیر جهت ارائه خدمات جانبی

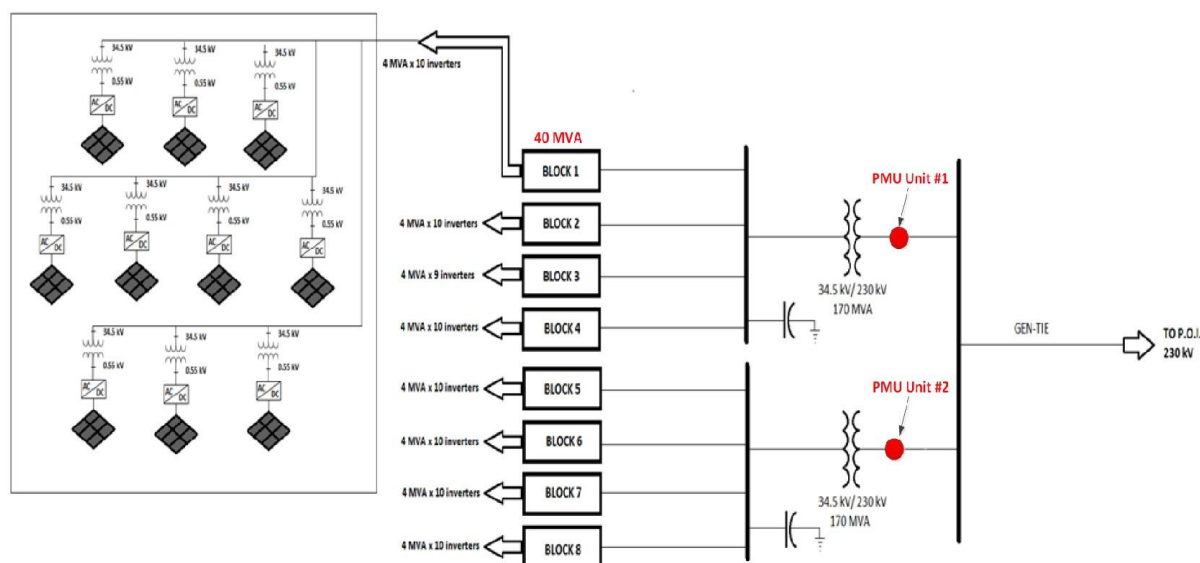
تیم پروژه متشکل از کارشناسان شرکت CAISO، First Solar و NREL<sup>۲</sup>، طرحی را اجرا کردند که نشان داد چگونه منابع انرژی خورشیدی می توانند با کنترل توان اکتیو و راکتیو از یک منبع انرژی متناوب ساده به یک منبع ارائه دهنده خدمات جانبی تبدیل شوند. طیف وسیعی از خدمات جانبی این آزمایش بر روی یک نیروگاه خورشیدی متصل به شبکه در مقیاس کاربردی واقعی انجام شده است، این آزمایش واقعی داده های ارزشمندی را برای همه سهامداران در کالیفرنیا و سراسر کشور ارائه می کند. اگر برق تولید شده توسط نیروگاه خورشیدی بتواند خدمات جانبی را ارائه دهد که به نفع سیستم قدرت باشد و

<sup>۱</sup> . North American Electric Reliability Corporation

<sup>۲</sup> . National Renewable Energy Laboratory

برای صاحبان و مشتریان نیروگاه های اقتصادی باشد، این عملکرد باید شناسایی و تشویق شود. تیم پروژه به دنبال آن بود که برخی شکاف ها را در دیدگاه های موجود بین گروه های ذینفع مختلف در کالیفرنیا و ایالات متحده با ارائه داده های آزمایشی واقعی از یک نیروگاه خورشیدی عملیاتی در مقیاس بزرگ را پاسخ دهد. این پروژه با هدف از بین بردن موانع برای استفاده از خدمات جانبی توسط تولید نیروگاه خورشیدی به ظرفیت ۳۰۰ مگاوات و تأثیرات بر سیستم است. توضیحات و نتایج آزمایشات بعدی انجام شده توسط تیم در بخش های مرجع مذکور بطور مفصل ارائه شده که ما در این مقاله به گوشه ای از آن اشاره خواهیم کرد (CAISO, 2021).

این نیروگاه (در ۲۴ آگوست ۲۰۱۶) از طریق دو ترانسفورماتور ۱۷۰ مگا-ولت-آمپر (۲۳۰/۳۴/۵ کیلوولت) به خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت متصل می شود. سمت ۳۴/۵ کیلوولت هر ترانسفورماتور با چهار بلوک با ۴۰ مگا-ولت-آمپر به سیستم کلکتور ولتاژ سطح متوسط نیروگاه متصل می شود. واحدهای اینورتر نیروگاه خورشیدی منفرد، هر کدام با ولتاژ ۴ مگا-ولت-آمپر، با ولتاژ ۴۸۰ ولت کار می کنند و از طریق ترانسفورماتورهای به سیستم کلکتور ۳۴/۵ کیلوولت متصل می شوند. بانک های خازن سوئیچ شده به هر دو متصل هستند. دو واحد اندازه گیری فازور برای جمع آوری داده ها در سمت ۲۳۰ کیلوولت هر دو ترانسفورماتور نیروگاه تنظیم شد.



شکل ۵- نمودار الکتریکی نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی (CAISO, 2021)

یکی از اجزای کلیدی این نیروگاه خورشیدی سازگار با شبکه، کنترل کننده خروجی نیروگاه (PPC)<sup>۱</sup> است که توسط First Solar توسعه یافته است. این کنترل کننده برای تنظیم توان اکتیو و راکتیو خروجی از نیروگاه خورشیدی طراحی شده است تا

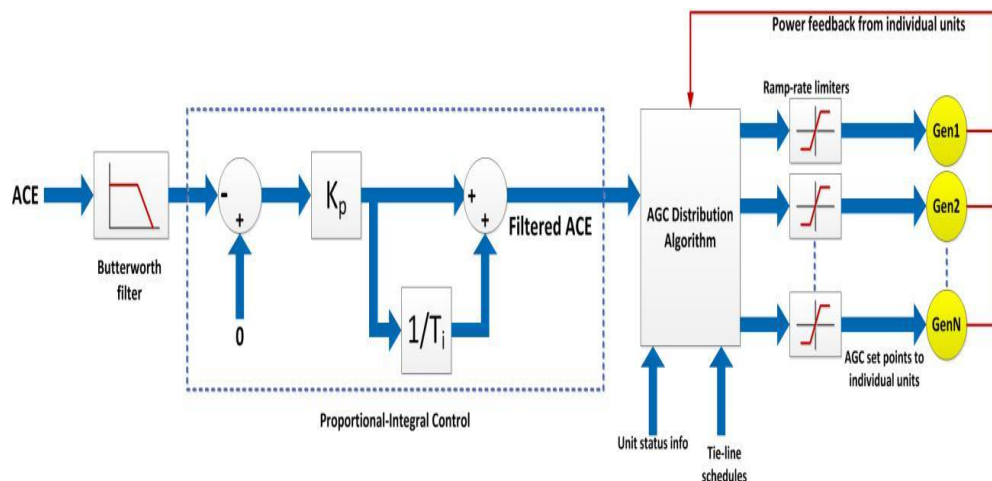
<sup>1</sup>. power plant controller



به عنوان یک ژنراتور بزرگ رفتار کند. اگرچه نیروگاه از اینورترهای مجزا تشکیل شده است، با هر اینورتر که تولید انرژی خود را بر اساس شرایط آرایه خورشیدی محلی انجام می دهد، عملکرد کنترل کننده نیروگاه هماهنگ کردن توان خروجی برای ارائه ویژگی های نیروگاه بزرگ، مانند کنترل توان اکتیو و کنترل ولتاژ از طریق تنظیم توان راکتیو است (Morjaria, 2014).

#### ۴-۱- آزمایش AGC<sup>۱</sup> برای نیروگاه خورشیدی ۳۰۰ مگاواتی

هدف از آزمایشات AGC این است که نیروگاه را قادر سازد تا نقاط تنظیم توان اکتیو ارسال شده توسط سیستم AGC CAISO را دنبال کند. سیگنال نقطه تنظیم توسط واحد پایانه راه دور در پست نیروگاه دریافت می شود و در همان چارچوب زمانی به PPC هدایت می شود. شکل ۶ یک نمودار کلی از AGC CAISO را نشان می دهد که سیگنال های نقطه تنظیم را به واحدهای تولید کننده ارسال می کند.



شکل ۶- نمودار ساده شده سیستم AGC CAISO (CAISO, 2021)

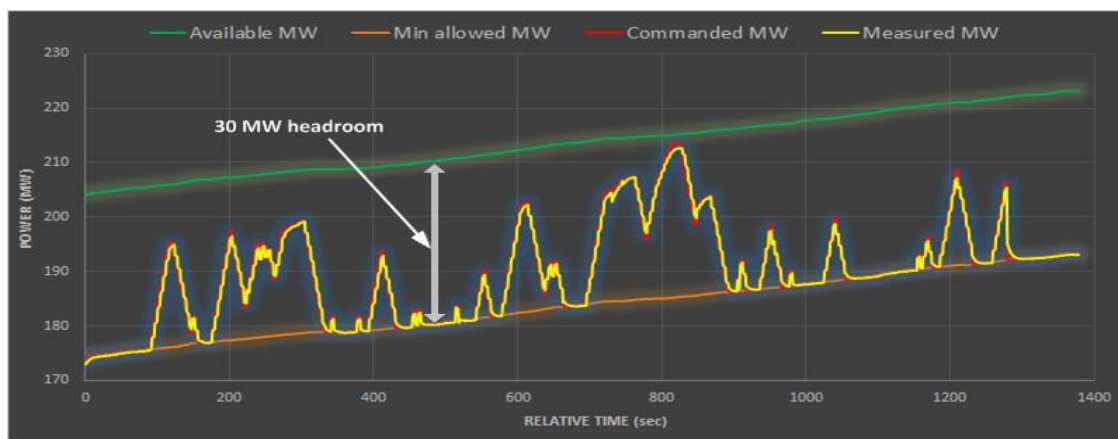
هنگامی که در حالت عملکرد AGC است، PPC در ابتدا نیروگاه را در سطح توانی که ۳۰ مگاوات کمتر از حداکثر توان تخمینی در دسترس بود، تنظیم کرد تا فضایی برای دنبال کردن سیگنال AGC را برای افزایش داشته باشد (شکل ۷). مرز پایین عملکرد AGC را می توان در هر سطحی زیر توان حداکثر قابل دسترس، از جمله محدود کردن کامل در صورت لزوم، تنظیم کرد. خطای کنترل ناحیه (ACE)<sup>۲</sup> یک عامل مهم در کنترل AGC است. نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی تحت آزمایش به عنوان یک واحد تولیدکننده در نظر گرفته می شود و خروجی های اینورتر جداگانه توسط عملیات CAISO در نظر گرفته نمی شود. AGC در ارتباط با سیستم های کنترل نظارتی و جمع آوری داده ها (SCADA)<sup>۳</sup> عمل می کند (NERC, 2011).

<sup>۱</sup> . Automatic Generation Control

<sup>۲</sup> . Area Control Error

<sup>۳</sup> . Supervisory Control and Data Acquisition

SCADA اطلاعات مربوط به فرکانس سیستم، خروجی های ژنراتور و تبادل واقعی بین سیستم و سیستم های مجاور را جمع آوری می کند. یک سیستم AGC با استفاده از فرکانس سیستم و مبادله خالص توان و دانش مبادله برنامه ریزی شده، نیازهای تعادل انرژی سیستم را در زمان واقعی تعیین می کند. سیستم CAISO SCADA به صورت متوالی برای داده های سیستم الکتریکی، با تناوب چهار ثانیه عمل می کند. میزان موفقیت AGC در انطباق با تعادل و کنترل فرکانس در آمار انطباق عملکرد کنترل منطقه متعادل کننده و معیارهای تعریف شده توسط کنترل NERC آشکار می شود. اطلاعات اندازه گیری شده برای آزمایش های AGC در ۲۴ آگوست ۲۰۱۶ در شکل نشان داده شده است. آزمایش زمانی آغاز شد که به نیروگاه دستور داده شد تا تولید خود را به سطح پایین تر (نارنجی) کاهش دهد که ۳۰ مگاوات کمتر از حداکثر توان موجود (سبز) بود. سپس سیگنال AGC (قرمز) به PPC داده شد و خروجی نیروگاه (زرد) بر این اساس در حال تغییر بود و عملکرد مناسب AGC را با پیروی از نقطه تنظیم در طول این دوره تولید نشان داده است. آزمایش مشابهی در ساعات اوج تولید انجام شده است.



شکل ۷- تست صبحگاهی AGC (۹:۴۷ صبح تا ۱۰:۱۰ صبح) (CAISO, 2021)

خطای نسبی کنترل AGC به عنوان درصد ظرفیت نصب شده کارخانه برای آزمایش AGC در طول سه دوره زمانی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- خطای کنترل AGC (CAISO, 2021)

تغییرات تنظیمی برای محاسبه مقادیر دقت تنظیم آن استفاده شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. جدول ۱ برای هر سه دوره آزمایش دقت تنظیم را برای تولید CAISO برای مقایسه فهرست می کند. با مقایسه نتایج آزمایش نیروگاه خورشیدی از جدول ۱ برای فناوری های دیگر در جدول ۲، می توان نتیجه گرفت که دقت تنظیم توسط نیروگاه خورشیدی حدود ۲۴-۳۰ درصد بهتر از توربین گازی است. داده های این آزمایش ها توسط CAISO در طراحی بازار خدمات جانبی برای تعیین میزان ظرفیت جهت تنظیم بالا و پایین فرکانس استفاده خواهد شد.

جدول ۱- دقت تنظیم اندازه گیری شده توسط نیروگاه خورشیدی ۳۰۰ مگاوات (CAISO, 2021)

دوره زمانی	نتایج آزمایش نیروگاه خورشیدی (درصد)
طلوع خورشید	۹۳.۷
وسط روز	۸۷.۱
غروب خورشید	۸۷.۴

جدول ۲- دقت تنظیم نیروگاه های مختلف CAISO (CAISO, 2021)

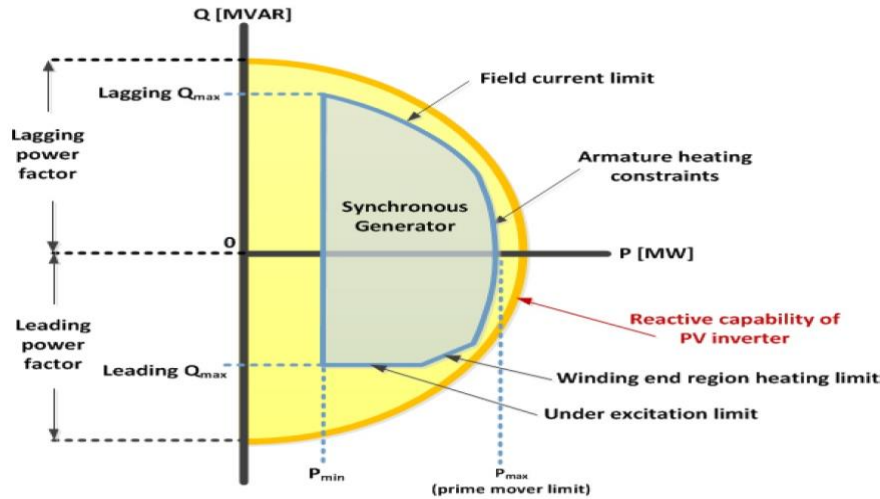
	توربین بخار	توربین آبی ذخیره ای	توربین گازی	سیکل ترکیبی
دقت (درصد)	۴۰	۴۵.۳۱	۶۳.۰۸	۴۶.۸۸

#### ۲-۴- آزمایش قابلیت کنترل ولتاژ و توان راکتیو

ولتاژ در سیستم قدرت آمریکای شمالی معمولاً توسط اپراتورهای ژنراتور تنظیم می شود که معمولاً با برنامه های تنظیم ولتاژ توسط اپراتورهای انتقال ارائه می شوند (NERC-Report, 2012). در گذشته تنظیم ولتاژ سیستم تقریباً توسط ژنراتورهای

سنکرون ارائه می‌شد اما با افزایش سطح نفوذ توان تولید متغیر بادی و خورشیدی نیاز به مشارکت آنها در تنظیم ولتاژ و توان راکتیو سیستم‌های قدرت شده است. طبق توافقنامه اتصال ژنراتور بزرگ<sup>۱</sup> FERC، ضریب توان مورد نیاز ژنراتور بزرگ  $\pm 0.95$  است. در نیروگاه‌ها با ژنراتورهای سنکرون، محدوده توان راکتیو معمولاً به صورت دینامیکی تعریف می‌شود و ژنراتورهای سنکرون باید به طور مداوم تولید یا جذب توان راکتیو خود را در محدوده ضریب توان  $\pm 0.95$  تنظیم کنند. در دستور ۸۲۷، FERC یک قانون نهایی را صادر کرد. همه ژنراتورها، از جمله ژنراتورهای بادی و خورشیدی، تأسیسات خود را طوری طراحی کنند که قادر به ارائه توان راکتیو باشند. تأسیسات مولدها باید قادر به حفظ یک تحویل توان ترکیبی در خروجی توان نامی در سمت بالای پست تولید در ضریب توان  $\pm 0.95$  باشند (FERC, 2016).

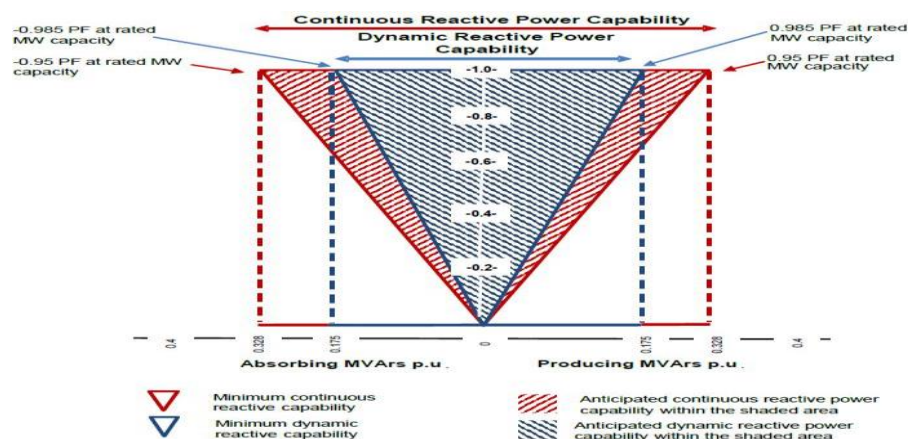
قابلیت توان راکتیو نیروگاه‌های با ژنراتورهای سنکرون توسط عوامل بسیاری از جمله حداکثر و حداقل قابلیت بارگذاری، محدودیت‌های حرارتی ناشی از ظرفیت‌های جریان روتور و استاتور و محدودیت‌های پایداری محدود می‌شود. توانایی ارائه توان راکتیو در بارهای صفر معمولاً با بسیاری از طرح‌های کارخانه بزرگ امکان‌پذیر نیست. قابلیت توان راکتیو یک اینورتر PV<sup>۲</sup> تنها با محدودیت جریان آن تعیین می‌شود. اینورتر PV باید بتواند با جریان کامل با قابلیت توان راکتیو مشابه آنچه در شکل ۹ نشان داده شده است، کار کند. به طور کلی، برای MVA مشابه، انتظار می‌رود که یک نیروگاه PV قابلیت توان راکتیو بسیار بالاتری نسبت به یک نیروگاه مبتنی بر ژنراتور سنکرون داشته باشد، همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است. اینورترهای PV می‌توانند پشتیبانی توان راکتیو را در توان اکتیو صفر، مشابه STATCOM ارائه دهند.



شکل ۹- مقایسه توان راکتیو برای ژنراتور سنکرون و اینورتر PV با رتبه های MVA و MW یکسان (CAISO, 2021)

<sup>1</sup> . Federal Energy Regulatory Commission

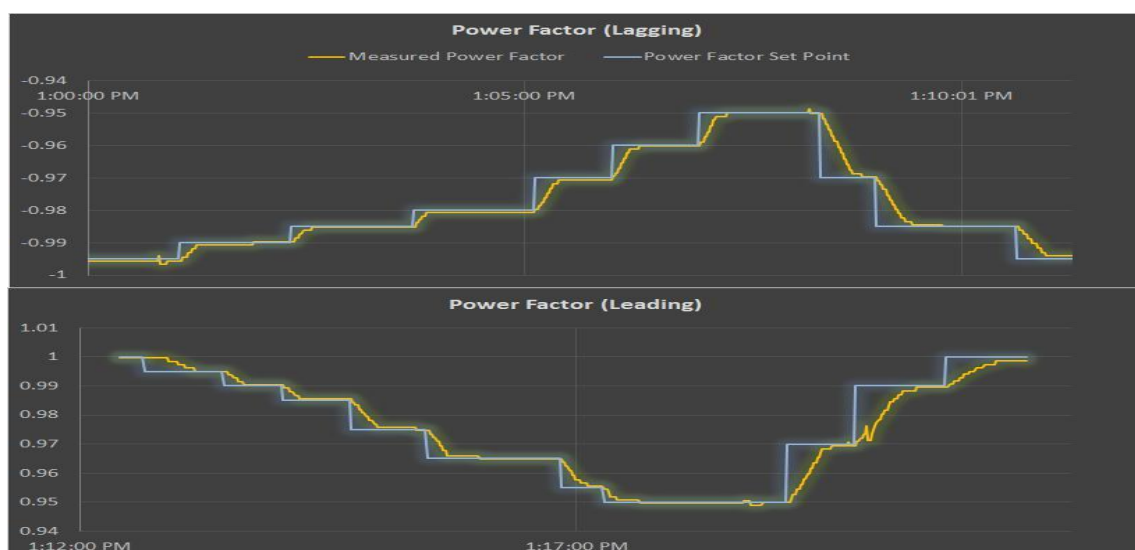
<sup>2</sup> . Photovoltaic



شکل ۱۰- قابلیت توان راکتیو پیشنهادی برای منابع غیرسنکرون (CAISO, 2021)

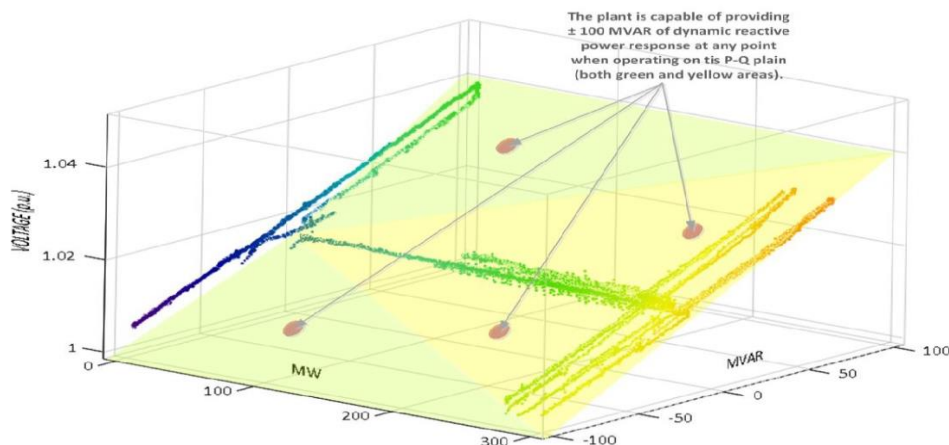
CAISO پیشنهاد کرد که یک نیاز پیوسته از منابع همراه با اینورتر برای ارائه قابلیت توان راکتیو و تنظیم ولتاژ همانطور که در نشان داده شده است اتخاذ شود (شکل ۱۰). بر اساس پیش نویس پیشنهادی CAISO در مورد توان راکتیو، تاسیسات تولید غیرسنکرون باید دارای قابلیت توان راکتیو پیوسته و پویا برای محدوده ضریب توان  $\pm 0.985$  و  $\pm 0.95$  باشد (CAISO, 2015).

آزمایش کنترل ضریب توان در نقطه بین حد پایین و بالا (به ترتیب  $0.95 \text{ pu}$  و  $1/0.5 \text{ pu}$ ) همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، انجام شد.



شکل ۱۱- تست کنترل ضریب توان در حالت پس فاز و پیش فاز (CAISO, 2021)

قابلیت توان راکتیو نیروگاه در ۲۳ و ۲۴ آگوست ۲۰۱۶ در دو سطح توان مختلف آزمایش شد. قابلیت تولید توان راکتیو نیروگاه در آزمایش‌هایی که نیروگاه در حال تولید سطوح بالای توان اکتیو (۲۵۰ مگاوات و بالاتر) و سطوح بسیار پایین تولید (کمتر از ۵ مگاوات) اندازه‌گیری شد. نتایج هر دو آزمون در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند که در آن نقاط آبی نشان دهنده نقاط داده اندازه‌گیری شده توسط PMU<sup>۱</sup> نیروگاه است. اندازه‌گیری‌ها با نیاز توان راکتیو CAISO پیشنهادی برای تولید (مثلاً زرد) مقایسه می‌شوند و نشان می‌دهند که نیروگاه توانایی توان راکتیو مورد انتظار را برآورده می‌کند. علاوه بر این، نیروگاه قادر به تولید و جذب توان راکتیو در توان تولید نزدیک به صفر است.

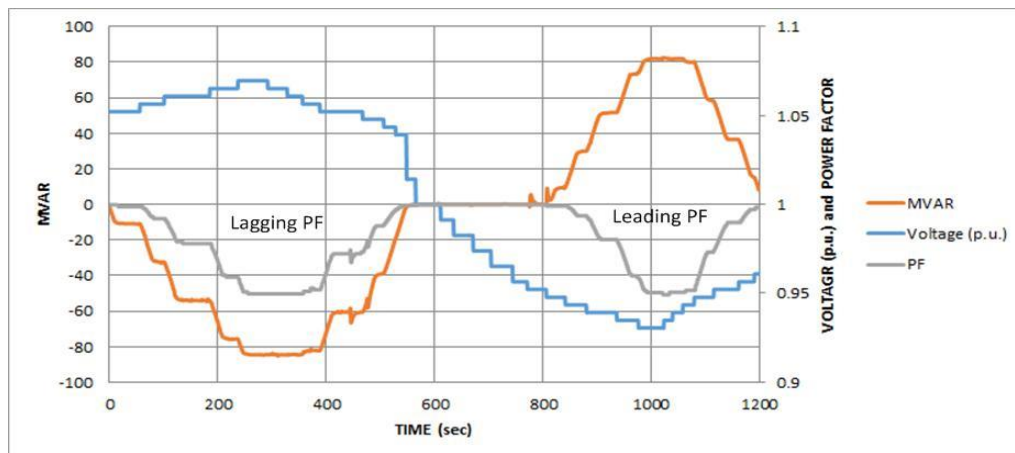


شکل ۱۲- نتایج آزمایش کنترل حد ولتاژ (CAISO, 2021)

نیروگاه برای نشان دادن عملیات کنترل در حالت کنترل ضریب توان و مشخص کردن پاسخ سیستم کنترل به تغییرات در نقطه تنظیم PF آزمایش شد. نرخ‌های شیب توان راکتیو و محدودیت‌های PF برای این آزمون به ترتیب  $\pm 100$  (MVAR/min) و  $\pm 0.95$  تعیین شد. برای هر دو آزمایش، سیستم تقریباً با توان خروجی کامل کار می‌کرد. مطابق با شکل ۱۳ بدون هیچ‌گونه مشکل نوسانی و پایداری با نرخ‌های شیب مشخص به اهداف PF خود می‌رسد.

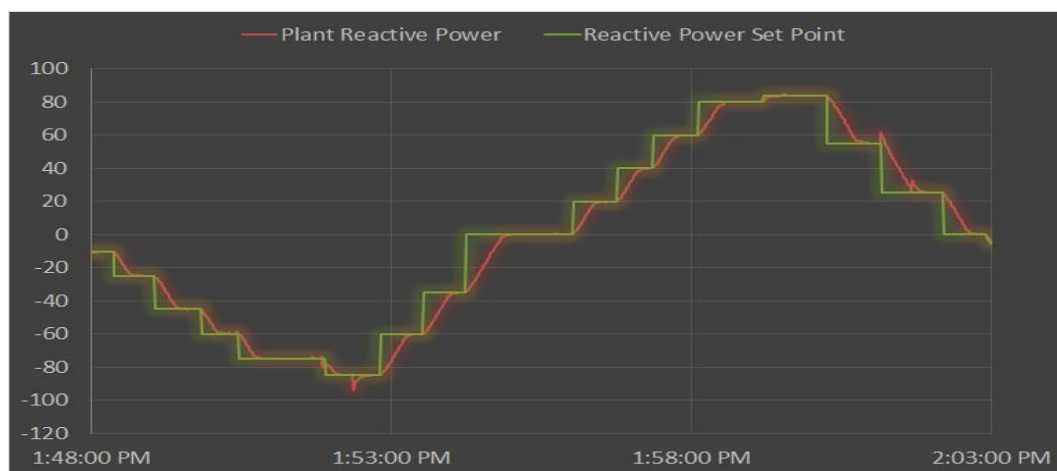
<sup>۱</sup>. Phasor Measurement Unit





شکل ۱۳- آزمون های کنترل ضریب توان تاخیر و پیشرو (CAISO, 2021)

نتایج آزمون کنترل نقطه تنظیم توان راکتیو در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این آزمایش در طول دوره تولید توان بالا انجام شد و هدف آن نشان دادن توانایی نیروگاه برای حفظ VARهای خازنی یا القایی در  $POI^1$  بود. همانطور که در شکل نشان داده شده است، نیروگاه به طور کامل قادر به پیروی از نقاط تنظیم توان راکتیو با شیب توان راکتیو تعیین شده بود.



شکل ۱۴- تست کنترل توان راکتیو (CAISO, 2021)

تمرکز این پروژه بر کنترل توان اکتیو و راکتیو برای ارائه خدمات جانبی توسط یک نیروگاه خورشیدی در مقیاس ۳۰۰ مگاواتی در محدوده CAISO بود. قابلیت های کنترل توان اکتیو برای نیروگاه های متصل به اینورتر مانند نیروگاه های خورشیدی

<sup>1</sup> . Point of Interconnection

چندین سال است که تایید شده و در دسترس است. با این حال، بسیاری از این قابلیت ها در یک محیط عملیاتی تجاری واقعی با ارتباط با اپراتور نیروگاه روی زمین و همچنین اپراتور سیستم (اعم از شرکت برق یا اپراتور سیستم انتقال) اثبات نشده است. این پروژه نتیجه همکاری CAISO، NREL و First Solar است. آزمایش های AGC توانایی نیروگاه را برای دنبال کردن سیگنال های ارسال AGC CAISO در طول سه بازه زمانی با شدت های متفاوت منبع خورشید نشان داده شد. برای این منظور نیروگاه ۳۰ مگاوات از حداکثر توان موجود خود را محدود کرد تا قابلیت مانور برای دنبال کردن سیگنال AGC CAISO را داشته باشد. در این آزمایشات، عملکرد AGC سریع و دقیق در شرایط مختلف منابع خورشیدی نشان داده شده است. این نیروگاه همچنین توانایی کار در سه حالت مربوط به کنترل توان راکتیو را نشان داد: تنظیم ولتاژ، تنظیم ضریب توان و حالت های کنترل توان راکتیو. کنترل کننده نیروگاه قادر بود با تنظیم توان راکتیو تولید یا جذب شده توسط اینورترهای PV، نقاط تنظیم ولتاژ مشخص شده را در POI حفظ کند. همچنین توانایی نیروگاه برای تولید یا جذب توان راکتیو در تولید نزدیک به صفر مگاوات (حالت STATCOM) نیز نشان داده شده است.

##### ۵- نتیجه گیری

استفاده از انرژی های خورشیدی در مقیاس نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی برای کنترل فرکانس و ولتاژ در شبکه تجدیدساختار شده برق کالیفرنیا نشان دهنده یک گام مهم در بهره برداری از منابع تجدیدپذیر است. با توجه به نیاز روزافزون به پایداری و قابلیت اطمینان بیشتر در شبکه برق، این رویکرد می تواند به عنوان یک مدل برای سایر مناطق مورد توجه قرار گیرد. نیروگاه های خورشیدی، علاوه بر تولید انرژی پاک، با ارائه خدمات جانبی مانند کنترل فرکانس و تثبیت ولتاژ شبکه، نقش کلیدی در بهبود کیفیت و پایداری شبکه ایفا می کنند. این امر می تواند به کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای کمک کند. همچنین، با بهره گیری از فناوری های پیشرفته مدیریت شبکه و بهینه سازی بهره برداری از منابع خورشیدی، امکان بهبود عملکرد اقتصادی و فنی شبکه فراهم می شود. به طور کلی، ادغام منابع خورشیدی به این شکل می تواند زمینه ساز توسعه پایداری و کارآمدتر سیستم های انرژی در آینده باشد و نقشی حیاتی در انتقال به یک سیستم انرژی پایدار و کم کربن ایفا کند.

##### ۶- منابع

- Bartridge et al. (2021). Electric System Reliability and the Recent Role California's Fossil Fleetr / CEC-700-2021-002. California: California Energy commission.
- CAISO. (2013). CAISO Standards for Imports of Regulation. California.
- CAISO. (2015). Reactive Power and Financial Compensation. California ISO.
- CAISO. (2021). Demonstration of Advanced Reliability of Services From a Utility-Scale Solar PV Plant. California: California ISO.
- California Annual Report (2021). California Public Utilities Commission.
- California-Public-Utilities-Commission. (2013). "Renewables Portfolio Standard Quarterly Report 1st and 2nd Quarter 2012,". California: California Public Utilities Commission.
- Energy Information, U. (2016). US Energy Information Administration,". Electric Power Monthly.
- FERC. (2016). Reactive Power Requirements for Non-Synchronous Generation, FERC Order 827. FERC.
- Horiuchi. (2001). "A dissertation to the FACULTY OF THE GRADUATE SCHOOL UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA in Requirements for the Degree DOCTOR OF PUBLIC ADMINISTRATION. California: UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA.
- Morjaria. (2014). A Grid-Friendly Plant. IEEE Power and Energy Magazine.

- Munsell, M. (2016). US Solar Market Sets New Record, Installing 7.3GW of Solar PV in 2015, Greentech Media.
- NERC. (2011). Balancing and Frequency Control. NERC.
- NERC-Report. (2012). Interconnection Requirements for Variable Generation. NERC 2012 Special Assessment Report.
- North-American-Electric-Reliability-Corporation. (2015). Essential Reliability Service Task Force Measures Framework Report," , December . North American Electric Reliability Corporation.
- Reliability Corporation, N.-A.-E. (2012). Integration of Variable Generation Task Force Report. Washington, DC: North American Electric Reliability Corporation.