

تأثیر سیستم های فتوولتاییک مرتبط با شبکه بر پایداری ولتاژ شبکه های توزیع

تونسی با استفاده از کنترل توان راکتیو دینامیک

چکیده

آنالیز پایداری ولتاژ شبکه انتقال با درجه بالای یکپارچه سازی فتوولتاییک (PV) به دلیل تولیدهای تصادفی سیستم خورشیدی، یک مشکل چالش برانگیز است. پایداری سازی توان خروجی یک معیار مهم برای تعیین درجه نفوذ فتوولتاییک در شبکه های توزیع فعال، با در نظر داشتن قابلیت بارگیری، است. این مقاله استراتژی تنظیم ولتاژ موثر برای سیستم انتقال را با استفاده از ماژول STATCOM به منظور برطرف کردن افت و جنبه های تأثیر بر پایداری ولتاژ در شبکه انتقال، توصیف می کند. این مقاله همچنین تأثیر سیستم کنترل STATCOM بر جلوگیری کردن ترکیب ولتاژ تزریق STATCOM و هارمونیک ها از دستیابی به جبران ولتاژ خالص، مورد تحلیل قرار می دهد. سیستم آزمایش تحت آنالیز پیشنهادی، شبکه قدرت توزیع تونسسی با ۵۳-شین (باس) که با نیروگاه فتوولتاییک خورشیدی ۱۲ مگاواتی ادغام می شود، می باشد. نتایج شبیه سازی اضافه شدند تا بازدهی روش کنترل پیشنهادی را برای ارتقای کیفیت سیستم برق بر مبنای کد شبکه تونسسی نشان دهد. بررسی پایداری ولتاژ نشان می دهد که رفتار دینامیکی ولتاژ به شدت به ظرفیت مدار کوتاه شبکه قدرت در نقطه ادغام فتوولتاییک بستگی دارد.

کلیدواژه ها:

پایداری گذرا . مولد فتوولتاییک خورشیدی پراکنده . کیفیت برق . STATCOM . سیستم توزیع تونسسی . کد شبکه

۱. مقدمه

در حال حاضر، شبکه های توزیع تنها برای سرویس شعاعی طراحی می شوند، با ایستگاه های قدرت متمرکز که برق را برای تحویل شبکه ها در فاصله های زیاد فراهم می کنند. با این وجود، بدلیل اینکه مولدهای پراکنده و غیرمتمرکز تدریجا به سیستم های توزیع برق اضافه می شوند، شبکه های توزیع دچار تغییرات چشمگیری می شود. منابع تجدیدپذیر انرژی سهم بزرگی را در سبک پراکنده تولید، که اخیرا به شدت رو به افزایش بوده، در طول چند سال گذشته و خصوصا قرن ۲۱ به خود اختصاص داده اند. مقدار قابل توجهی از این سبک پراکنده تولید، با کمک منابع انرژی تجدیدپذیر تامین می گردد. در این سیستم های تولید، منابع تجدیدپذیر مانند زیست توده، پیل های سوختی، برق آبی، خورشیدی و بادی، پتانسیل و قابلیت امیدوار کننده ای را نشان داده اند [2]. تولید انرژی تجدیدپذیر هم جذاب و هم به صرفه است زیرا یک گزینه تجدیدپذیر ارابه می کند که به طور قابل توجهی میزان انتشار ناشی از سوخت های فسیلی را کاهش می دهد. سیستم های فتوولتاییک خورشیدی در یک شبکه می توانند به یک روش دولایه (two-tier) بهم متصل شوند و چنین سیستم هایی می توانند به سه نوع اصلی از نظر اندازه طبقه بندی شوند: کوچک، متوسط و بزرگ. نیروگاه های برق فتوولتاییک (PVPP) بزرگتر، ظرفیت این را دارند که بیش از ۱۰۰ مگاوات تولید نمایند. بنابراین، می توانند به ولتاژهای متوسط و بالا متصل شوند [3-4]. این نوع از انرژی فتوولتاییک، که معمولا در سه مرحله تحویل داده می شوند، شامل مبدل های موازی با سیستم قدرت هستند. دسته دیگر، فتوولتاییک های مقیاس متوسط می باشد، با تولید بین ۱ تا ۱۰۰ مگاوات، که به مرحله توزیع ارتباط داده می شود [5-6]. تاثیرات منفی ممکن میزان های نفوذ افزایش یافته نیروگاه های برق فتوولتاییک بر پایداری سیستم قدرت، نگرانی ها را متوجه تجهیزات و تاسیسات می کنند [7]. مولدهای خورشیدی که به موزات انواع متداول مولدهای همزمان (سنکرون) عمل می کنند، با چالش های جدیدی از نظر کنترل، عملیات و پایداری سیستم قدرت کلی و اجزای آن مواجه هستند [8]. [9] آنالیز پایداری ولتاژ شبکه انتقال، بدلیل پیچیدگی سیستم های قدرت جدید و ادغام و یکپارچه سازی سیستم فتوولتاییک که همواره رو به گسترش است، یک کار بشدت چالش برانگیز است. پایداری ولتاژ سیستم قدرت توسط بسیاری از محققین [5-23, 25-35] بررسی و مطالعه شده است تا تاثیرات فتوولتاییک های با میزان تولید بالا را

آشکار کند. بطور خاص، پکیج شبیه سازی DigSILENT PowerFactory در [28] استفاده شده است تا پایداری ولتاژ را در طول عملیات های حالت پایا و گذرا مورد مطالعه قرار دهد.

کار ارایه شده تاثیر ادغام کردن نفوذ زیاد فتوولتاییک به سیستم قدرت مصری را نشان می دهد. عملکرد سیستم قدرت اردنی با نیروگاههای فتوولتاییک بزرگ یکپارچه و تولید نیروی بادی توسط نرم افزار DigSILENT در [29] به دقت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی تعیین می کنند که میزان نفوذ منابع انرژی بادی و خورشیدی نباید از مرز ۱۰٪ نیاز بیشینه سالانه اردن بیشتر شود تا از فروپاشی شبکه جلوگیری گردد. تاثیر ادغام نیروگاه خورشیدی ۱ مگاواتی به شبکه بحرین با استفاده از نرم افزارهای PVsyst و PSSE در [30] بررسی شده است. تمرکز نتایج شبیه سازی با این هدف است که نشان دهد چگونه شرایط آب و هوایی می تواند توسط سیستم های فتوولتاییک برای برطرف کردن نیاز بیشینه، استخراج و استفاده گردد. پایداری ولتاژ سیستم بهم پیوسته ی بزرگتر از طریق ارزیابی کمی تاثیر نفوذ زیاد واحدهای فتوولتاییک کوچک کار گذاشته شده (embedded) در شبکه های توزیع، در [31] ارائه شده است. علاوه بر این، ضروری است که نیروگاههای برقی فتوولتاییک بزرگتر باید در طول اختلال های زیاد ولتاژ شبکه به شبکه انتقال متصل بمانند زیرا قطع اتصال برق فتوولتاییک بزرگ ممکن است بازایی ولتاژ را در طول اختلال و پس از بازایی نقص، بیش ازین بدتر کند [32]. بنابراین، مطالعات پایداری ولتاژ توجه بسیاری از محققین را به سمت صلاحیت و قابل اطمینان بودن گذار از ولتاژ پایین (LVRT) مولدهای فتوولتاییک با نفوذ بالا، جلب کرده است [22-5]. نیروگاههای برق فتوولتاییک متصل به شبکه از طریق گستره متنوعی از قابلیت نفوذ، در [40-33] مطالعه قرار گرفته اند. پایداری ولتاژ گره تحت تاثیر ادغام مولدهای خورشیدی به شبکه های توزیع ولتاژ متوسط قرار می گیرند [11-10]. این پایداری ولتاژ معین شده بدلیل ناتوانی شبکه در نگه داشتن سطح ولتاژ قابل قبول در همه جای شبکه تحت شرایط عملیات متفاوت می باشد. ناپایداری ولتاژ به دلیل اختلالات کوتاه مدت یا بلندمدت غیرقابل کنترل که باعث افت فزاینده در سطح ولتاژ می شود، به وجود می آید [12]. دلیل تعیین کننده در فروپاشی ولتاژ، ناتوانی شبکه در تامین توان راکتیو مورد نیاز است. بنابراین، این مشکل نیازمند این است که با دقت و ریزینی بررسی گردد بویژه در صورتیکه مولدهای فتوولتاییک خورشیدی وجود داشته باشند. در فواصل دور، پایداری سیستم قدرت

تحت تاثیر انرژی انتقال قرار می گیرد که برای کنترل ولتاژ و برای حل چالش هایی از قبیل تغییر شرایط بار [13-14]، حفظ تعادل با توان های اکتیو و راکتیو (فعال و واکنشی) و همچنین افزودن منابع تجدیدپذیر انرژی، مورد نیاز است. جبران توان راکتیو می تواند با روش های متنوعی حفظ شود اما این امر می تواند منجر به مشکلات اسف باری مانند تزریق هارمونیک ها، جبران غیرپیوسته و جریان هجومی بزرگ به سمت سیستم گردد [15-16]. بدلیل پیشرفت و توسعه های سریع در برق قدرت، افزاره های سیستم های انتقال جریان متناوب (AC) انعطاف پذیر (FACTS) به عنوان ابزارهای بسیار مقرون به صرفه بمنظور اثر گذاشتن بر شبکه واقعی تحت تاثیر تغییرات در شرایط عملیاتی سیستم، برای حفظ کردن سطوح ولتاژ و برای کنترل جریان های توان اکتیو و راکتیو، مورد توجه قرار گرفته اند. با بکارگیری روش های کنترل FACTS، و از طریق شبکه انتقال که به حالت سری یا شانت باشند، کنترل قدرت در تمام باس-بار های سیستم قدرت امکان پذیر است و انعطاف پذیری در طول کنترل زوایای فاز و امپدانس های خط وجود دارد [17-19]. جبران var استاتیک و جبران سنکرون استاتیک (STATCOM) مشهورترین ماژول ها در میان افزاره های FACTS هستند [18]. واحد STATCOM می تواند بطور تاثیرگذاری سریع درنظر گرفته شود و همچنین یکی از کارآمدترین ماژول ها در میان افزاره های FACT هست، که برای افزایش ظرفیت انتقال، رفتار دینامیکی و حاشیه پایداری استفاده می شود. همچنین بمنظور اطمینان از بهبود در کیفیت برق مورد استفاده قرار می گیرد [20-22]. یکی از اهداف اصلی این مقاله بررسی دقیق تاثیر ادغام مولدهای فتوولتاییک بر رفتارهای پایداری ولتاژ حالت پایا/دینامیک سیستم توزیع شعاعی تونسی می باشد. STATCOM ها یک راه چاره هستند برای زمانی که یک شبکه تحت تاثیر پیشامد احتمالی برای کنترل نوسانات ولتاژ و بالابردن پایداری گذرا قرار می گیرد [23,25,26]. فتوولتاییک های مقیاس بزرگ برای کمک رساندن به سیستم آزمایش در نیروگاه برق نصب می شوند. بعلاوه، و در نزدیکی بارها، استفاده از تولیدهای پراکنده (DGs) تجدیدپذیر می تواند به بقای پایداری سیستم کمک کند، در نتیجه این یک روش مطلوب است اما تولید پراکنده بستگی به شرایط معمولی برای استفاده از تولید تجدیدپذیر دارد [27].

بدلیل اینکه حداکثر توان تولید شده از نیروگاه های برقی فتوولتاییک با مصرف بار پیک در تابستان تطابق دارد،

مولدهای خورشیدی برای استفاده در مناطق آفتابی به عنوان نیروگاه برق در پیک قابل اجرا و بکارگیری هستند. وظیفه مهم، استفاده از پتانسیل منابع پراکنده برای کاهش تاثیر ماهیت متغیر منبع خورشیدی بر سیستم قدرت بمنظور بهبود قابلیت اطمینان بر سیستم کلی است. وقتی که یک افزایش ناگهانی در تقاضای بار در شبکه بوجود می آید، همزمان باید کنترل کافی و مناسب بر روی ولتاژ و توان وجود داشته باشد [27]. تاکید این کار بر روی مازول منطق کنترل STATCOM برای بهبود کیفیت توان و چگونگی حصول اطمینان از عملیات پایدار یک سیستم انتقال خودکار می باشد. این مقاله همچنین کنترل مراحل عملیاتی برای مازول STATCOM با استفاده از جعبه ابزار آنالیز سیستم قدرت (Power System Analysis Toolbox) را شبیه سازی می کند تا اثر افزودن STATCOM بر سیستم ولتاژ و قابلیت بارگیری برای رسیدن به کیفیت سیستم بهینه را شرح دهد. مدل های دینامیکی یک واحد فتوولتائیک خورشیدی به طور خلاصه در بخش ۲ توصیف خواهند شد. همچنین، کنترل توان راکتیو با استفاده از STATCOM در بخش ۲ توضیح داده می شود. شبکه توزیع شعاعی با ۵۳ باس (گذرگاه) و پس از آن یک فرمولاسیون کلی از مطالعات مختلف و روش شناسی این کار به طور خلاصه در بخش ۳ ارائه خواهد شد. همچنین در بخش ۳، نتایج و مباحث مرتبط را گنجانده ایم. نتیجه گیری های کلی در بخش ۴ گنجانده شده اند. مراحل این مطالعه به این ترتیب است: (۱) محاسبه راه حل جریان بار برای تمامی گذرگاه های بار، همراه با ثبت کردن انتقال های حالت PV/PQ دینامیک مولد، با استفاده از الگوریتم نیوتن-رافسون (۲) تعیین پایداری ولتاژ بحرانی سیستم با و بدون STATCOM و ادغام فتوولتائیک (۳) محاسبه کوچکترین مکان هندسی مقدار ویژه برای ماتریس ژاکوبین جریان بار استاتیک تا وضعیت های بحرانی و (۴) آنالیز عملکرد و کیفیت قدرت سیستم تحت مطالعه برای تحقق کدهای الزام شبکه تونسی. این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲. سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه متداول، از یک آرایه فتوولتائیک، مبدل تقویت کننده DC به DC، اینورتر 3-Ø AC، کنترل کننده ردیابی نقطه توان بیشینه (MPPT)، فیلترها و ترانسفورمر تشکیل می گردد. در عملیات واقعی، پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان، خورتاب گیری (تشعشع گرمایی خورشید)/ تابش، دما و غیره پانل

فتوولتاییک برای نظارت مداوم در سیستم متصل به شبکه ضروری است.



شکل ۱: مراحل پایداری ولتاژ

روش مورد استفاده برای پیاده کردن مدل با تمام اندازه گیری های پارامتری مورد نیاز در شکل ۲ که در زیر آورده شده نشان داده شده است. مقدار خروجی جریان که از یک سلول فتوولتاییک کشیده می شود، در معادله ۱ آورده شده است که مشخصه های جریان-ولتاژ سلول فتوولتاییک ایده آل را نشان می دهد [38-39].

$$I_{cell} = I_{SC} - I_d - \frac{U_{cell} R_s}{R_p} \quad (1)$$

که در آن I_{SC} جریان تولید شده بوسیله ی تابش تصادفی، I_d جریان در دیود شاکی، R_s مقاومت سری و R_p مقاومت متصل موازی است. بعلاوه، مقدار R_s در مقایسه با مقدار R_p بسیار کم است و مقدار R_s می تواند نادیده گرفته شود. مقدار جریان دیود همانطور که در معادله (۲) نشان داده محاسبه می شود:

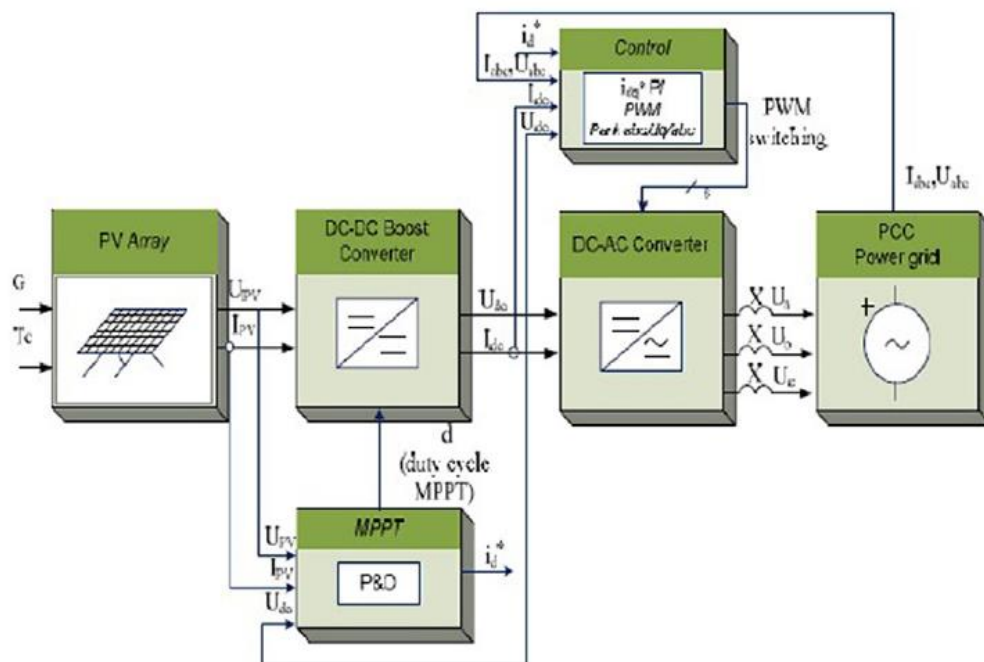
$$I_d = I_0 \cdot [\exp(\frac{q_e U_{cell}}{a_i K T_c}) - 1] \quad (2)$$

که در آن q_e بار الکترون (1.602×10^{-19})، k ثابت بولتزمن با مقدار 1.3806×10^{-23} ژول بر کلوین، T_c (کلوین)

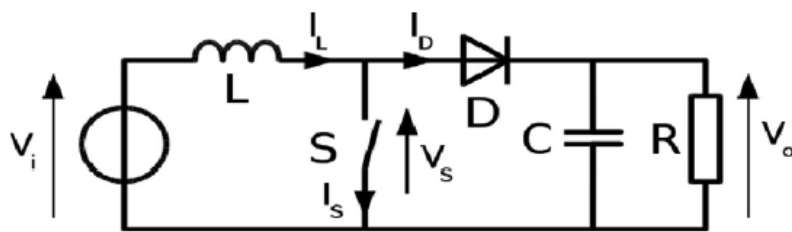
دما در اتصال P-N، a_i ثابت ایده آل بودن دیود ($1 \leq a_i \leq 1.5$) و I_0 جریان اشباع دیود است و وابسته بودن آن به دما/ تابش می تواند در معادله (۳) بصورت زیر بیان شود:

$$I_0 = \frac{I_{SC} + K_i \cdot (T_C - T_n)}{\exp[(U_{OC} + K_v \cdot (T_C - T_n)) / a_i U_t] - 1} \quad (3)$$

U_t ولتاژ دمایی N_s سلول متصل شده بصورت سری را در مقدار اسمی دمای T_n که سیستم برای یک مبدل DC به DC برای کنترل و محدود کردن ولتاژ dc نیاز دارد، را نشان می دهد. مقدار اضافه ولتاژ نتیجه شده کمتر از خروجی اینورتر بدون مبدل بوست DC-DC می باشد [9-23, 25-37]. این تنها دلیل برای استفاده از مبدلهای بوست DC-DC نشان داده در شکل ۳ می باشد. یک مبدل فتوولتاییک متصل به شبکه مشخصه های ولتاژ-جریانی دارد که ذاتا غیرخطی است و با دما و تابش تغییر می کند. یک نکته عملیاتی مشخص در نمودارهای ولتاژ-جریان و توان-ولتاژ ردیابی نقطه توان بیشینه (MPP) است.



شکل ۲: نمودار بلوک سیستم فتوولتاییک مرتبط با شبکه



شکل ۳: نمودار مدار مبدل بوست

این نقطه ای بخصوص در نمودار است که در آن پل فتوولتاییک توان خروجی بیشینه را در بازدهی بیشینه تولید می کند و به این مشخصه های ولتاژ-جریان و توان-ولتاژ و دما و تابش خورشیدی بستگی دارد.

با استفاده از تکنیک های و الگوریتم های متنوع MPPT، می توانیم نقطه را به سمت سطحی سازماندهی کنیم که در آن صرفنظر از میزان تابش، توان بیشینه را بدست آوریم [41]. در نتیجه، برای تابش خورشیدی یکسان، توان تحویل داده شده، بر طبق بار، متفاوت خواهد بود. یک کنترل کننده MPPT در نتیجه می تواند برای کنترل کردن مبدل متصل به بار و پل فتوولتاییک بمنظور فراهم کردن توان بیشینه پیوسته به بار، استفاده شود. بدلیل اینکه این پارامترها مدام تغییر می کنند، نقطه عملیاتی هم تغییر می کند [12]. اختلال و مشاهده (Perturb and Observe: P&O) یکی از تکنیک های معروف و مرسوم MPPT است. اختلال و مشاهده روشی است که به دلیل عملیات ساده اش، به طور گسترده در بین تمام روش های MPPT مورد استفاده قرار می گیرد [41]. اختلال و مشاهده جریان خروجی توان-ولتاژ و ولتاژ پایانه ای را براحتی محاسبه می کند، که از آن توان واقعی اندازه گیری می شود و با تغییر نرخ کاری مبدل dc-dc بوجود می آید مگر اینکه توان بیشینه بدست آید. این تکنیک MPPT در مبدل dc به dc استفاده می شود که نرخ/چرخه کاری آن بمنظور مکان یابی مقدار جریان نقطه توان بیشینه بر آرایه فتوولتاییک تنظیم می گردد. حتی، الگوریتم اختلال و مشاهده ردیابی نقطه توان بیشینه (P&O MPPT) می تواند تحت شرایط جوی که به سرعت تغییر می کنند [14]، تحت تغییرات در تابش و میزان دما و نقطه عملیاتی که ردیابی می شود، شکست بخورد؛ در نتیجه میزان نمونه گیری برای به انجام رساندن MPPT بطور کامل بهینه سازی می گردد [14]. در اختلال و مشاهده، نرخ/چرخه کاری تغییر می کند تا مقدار توان فعال بیشینه آرایه فتوولتاییک بدست آید. مدل مبدل منبع ولتاژ (VSC) همراه با فیلتر درجه اول اجرا شده و به شبکه انتقال متصل می شود (توجه کنید که مقدار مقاومت ها

نادیده گرفته می شود). یک ترانسفرمر بین سیستم توان-ولتاژ و شبکه برق در بلوک شبکه قدرت متصل می شود، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است.

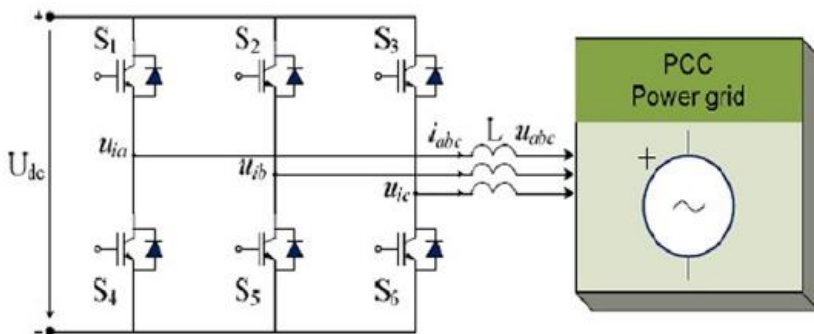
در اینجا، اینورتر توان اکتیو را به شبکه قدرت تزریق می کند و همچنین تزریق توان راکتیو به شبکه را کنترل می کند. معادلات ولتاژ سه فازی می تواند به شکل معادله (۴) بیان گردد:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{L} \begin{bmatrix} D_a \\ D_b \\ D_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

که D_a , D_b و D_c چرخه ها/نرخ اینورتر فتوولتاییک بر فازهای a, b و c در معادله (۴) هستند، که می توانند برای فازهای a-b-c مختصات dq در معادله (۵) و (۶) با استفاده از تکنیک تبدیل Parks بازنویسی گردند.

$$\begin{aligned} U_d &= U_{id} - L\omega i_q - L \frac{di_d}{dt} \\ U_q &= U_{iq} - L\omega i_d - L \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن U_{id} و U_{iq} به ترتیب مختصات های ولتاژ اینورتر dq هستند. ولتاژ اینورتر که $U_i = U_{dc} \cdot d$ هست، به معنی ولتاژ dc ورودی ضرب در چرخه/نرخ کاری یعنی D_a , D_b و D_c . جریان بیشینه I_t توسط اینورتر توان-ولتاژ تزریق می شود. این جریان توان های اکتیو و راکتیو را کنترل/محدود می کند و سپس توسط مولد فتوولتاییک به اینورتر فتوولتاییک تزریق می شود. این محدودیت از معادله یک چرخه محاسبه می شود که در معادله (۶) بیان شده است:



شکل ۴: نمودار بلوک مدار برای VSC به شبکه قدرت

$$P^2 + Q^2 = (U_g + I_i)^2 \quad (6)$$

که در آن U_g ولتاژ $1-\phi$ در سیستم قدرت، I_i ولتاژ $1-\phi$ در سیستم توان-ولتاژ و $P-Q$ نشان دهنده توان اکتیو و راکتیو در شبکه در قدرت می باشد. حالا معادله (۴) به این صورت بازنویسی می شود:

$$I_i = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U_a} \quad (۷)$$

I_i حد جریان اینورتر (معادله ۸)، R_2 و C_2 نشان دهنده شعاع و مرکز، $R_2 = U_g * I_i$ و $C_2 = (0,0)$ است. ولتاژ بیشینه اینورتر توان-ولتاژ، یعنی U_i ، این حد را اعمال می کند. این ولتاژ یک ظرفیت حد تکمیلی توان های اکتیو و راکتیو را توصیف می کند که در (۸) بیان شده است:

$$P^2 + \left(Q + \frac{U_g^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{U_g U_i}{X} \right)^2 \quad (۸)$$

I_i و U_i نشان دهنده جریان و ولتاژ $1-\phi$ اینورتر توان-ولتاژ هستند که بعلاوه، U_i بستگی به مقدار پیوسته ولتاژ از ورودی اینورتر دارد. X مقادیر راکتانس (مقاومت واکنشی) از پایانه های اینورتر را نشان می دهد. باز هم، (۹) میتواند اینگونه بازنویسی شود:

$$U_i = \sqrt{P^2 + \left(Q + \frac{U_g^2}{X} \right)^2} - \frac{U_g}{X} \quad (۹)$$

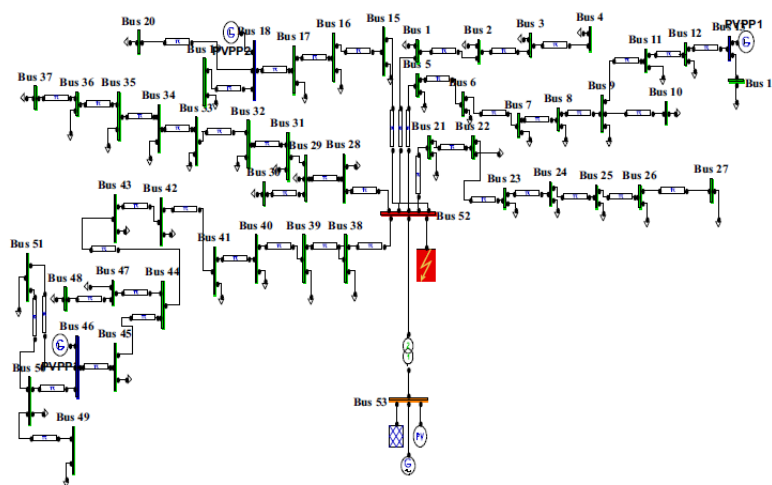
۳. آنالیز عددی

تمام آنالیزهای عددی با استفاده از جعبه ابزار بر پایه MATLAB برای مطالعات سیستم قدرت که با عنوان PSAT شناخته می شود، انجام شده است. این امر شامل آنالیز جریان بار، آنالیز پایداری دینامیکی، جریان برق بهینه، جریان برق پیوسته و ابزارهای پایداری گذرا است. این نرم افزار یک شبکه تک خطی و برپایه SIMULINK و یک واسط مشترک گرافیکی کامل را دارا می باشد.

۳.۱. توصیف سیستم

شکل ۵ ساختار یک سیستم توزیع اعمال شده در آنالیز ارائه شده را نشان می دهد. بدلیل اینکه طول خطوط توزیع

در هر بخش از ساختار سیستم توزیع از دو کیلومتر فراتر نمی رود، سیستم تنها شامل یک مولد همگام (سنکرون)، ۴۸ بار PQ ثابت، ۵۳ باس بار، یک ترانسفورمر و ۵۳ شاخه با مقدار پایه اسمی توان و ولتاژ به ترتیب 100 MVA و ۳۳ کیلوولت می باشد. در وضعیت پایه، سیستم بارگیری کلی 12.107 مگاوات و 3.952 MVAR می باشد. شبکه توزیع در یک میزان ولتاژ ۳۳ کیلوولت عمل می کند. ایستگاه قدرت اصلی متصل به شین (باس) ۵۳ با یک مولد توربین (TG) و AVR که بعنوان شین نوسانی انتخاب شده اند، محکم و فیت می گردد [25]. مولدهای خورشیدی که با برچسب های PVPP 1، PVPP 2 و PVPP 3 نامگذاری شده اند، به ترتیب به شین های ۱۳، ۱۸ و ۴۶ متصل می شوند.



شکل ۵: نمودار تک خطی یک سیستم توزیع متصل PVPP.

ظرفیت نصب شده حداکثر برای ظرفیت برق فتوولتایک برای هر مولد خورشیدی ۴ مگاوات است که با یک ضریب توان در گستره بین 0.95 پس افت (lag) و 0.95 پیش فاز (lead) کار می کند. تابش خورشیدی و دما در تمام طول آنالیز ثابت فرض می شوند. پارامترهای خطوط انتقال، توزیع بار برای هر مسیر، ایستگاه برق همگام (SG)، مقادیر پارامترهای اتخاذ شده برای مدل گاورنر و محرک توربین و پارامترهای ارزیابی شده برای نیروگاههای برقی فتوولتایک از [5-35] گرفته شده اند. ما نتایج آزمایش را برای پاسخهای گذرای نیروگاههای فتوولتایک مرتبط با شبکه را ارایه می کنیم زمانی که (اگر) یک نقص شبکه ای رخ دهد. ما عملکرد سیستم را برای منطبق بودن با کدهای مورد نیاز شبکه آنالیز کرده ایم [21-5]. به این منظور، ما نقص های اتصال کوتاه سه فازی را در شین (باس) شبکه انتقال

معمولی (مثلا شین ۵۲) اعمال کردیم. همچنین، ما شین ۵۲ شبکه را بعنوان یک شین خطا دار انتخاب کردیم زیرا شین اصلی برای توزیع برق به بقیه شبکه می باشد. یک (نقص) اتصال کوتاه سه فاز در زمان $t=5\text{ s}$ اعمال شد. برای بررسی کیفیت توان، نقص پس از ۵۰ میلی ثانیه پاک می شود و شبیه سازی ها با و بدون توان خورشیدی فتوولتاییک برای مقایسه، اجرا گردیدند. ماژول STATCOM برای کنترل ولتاژ از طریق جبران توان راکتیو مورد استفاده قرار می گیرد [26]. در مطالعه موردی واقعی، برای بررسی تاثیر ادغام و یکپارچه سازی STATCOM بر پایداری ولتاژ گذرا، شبکه توزیع که در استان Hammam-Lif که در شمال تونس در نزدیکی ساحل مدیترانه قرار دارد و دارای نفوذ فتوولتاییک ۱۲ مگاوات است را انتخاب کردیم.

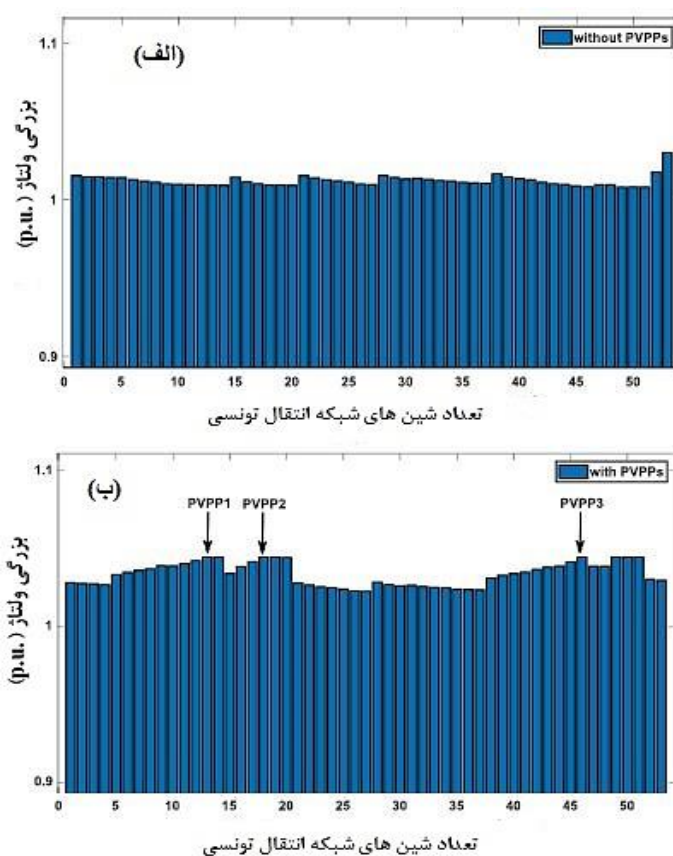
۳.۲. آنالیز ولتاژ حالت پایا

در مطالعات جریان بار استاتیک، ظرفیت کنترل ولتاژ نیروگاه های برق فتوولتاییک و تولید توان اکتیو معمولا با شین های مولد فتوولتاییک تلفیق و یکسان می شوند. اگر آنها به حدهای خود در تولید راکتیو برسند، به آنها شین های بار می گویند. از نظر این فرضیه [18]، ما نمایه (پروفایل) ولتاژ شبکه را با و بدون نیروگاه برق فتوولتاییک در شرایط بار پیک ارزیابی کردیم. در شکل ۶، این مشخصه را رسم کرده ایم. ما مشاهده کردیم که، وقتی توان فتوولتاییک صفر است (شکل الف ۶)، ولتاژ در شین های فتوولتاییک اتصال در $1.0.1\text{ p.u}$ می باشد. وقتی که هر سه مزرعه فتوولتاییک توان خورشیدی بیشینه خود را تزریق می کنند (شکل ب ۶)، میزان های ولتاژ در شین های اتصال با شرایط بار پیک افزایش می یابد و هیچ اضافه ولتاژی نشان داده نمی شود. نمایه ولتاژ شبکه و شین های فتوولتاییک به طور ویژه به 1.045 درصد افزایش یافتند. ولتاژها در شین های چندگانه شبکه در تلورانس های ۱۰٪ مناسب گنجانده شده است. شکل ۷ کوچکترین مکان هندسی مقادیر ویژه برای ماتریس ژاکوبین جریان بار استاتیکی را ارایه می دهد. برای افزایش وضوح شکل، بقیه مکان های هندسی مقادیر ویژه مورد توجه قرار نگرفته اند، با در نظر داشتن اینکه مقادیر ضعیفی دارند. ما متوجه شده ایم که مقدار ویژه حداقل ماتریس ژاکوبین جریان بار استاتیک برابر با 0.2 است که نشان می دهد سیستم پایدار است. مقایسه بین بزرگی ولتاژ با و بدون معرفی STATCOM می تواند در شکل ۸ نشان داده شود. پس از ادغام و یکپارچه سازی جبران همگام استاتیک به شین ۵۲، بزرگی ولتاژ برای تمام شین ها افزایش یافته

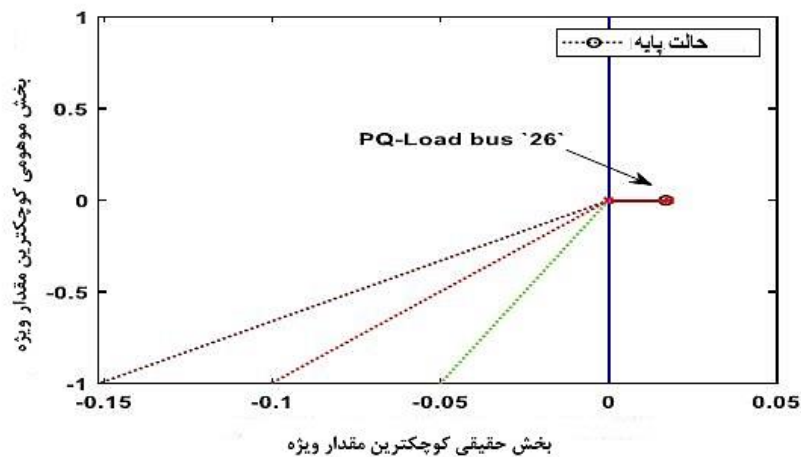
است، علاوه بر این، ولتاژ بهبود یافته است به ویژه در شین های های اتصال نیروگاه برق فتوولتایک همانطور که در شکل ۸ ارائه شده است که به وسیله تولید توان اکتیو خورشیدی بیشینه آنها بوده است همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است.

۳.۳. نتایج شبیه سازی برای کیفیت توان

در این قسمت، ما نتایج آزمایش پاسخ های گذرای نیروگاه های فتوولتایک مرتبط با شبکه را ارایه می کنیم وقتی که (اگر) یک نقص شبکه رخ دهد. ما عملکرد شبکه را برای مطابقت با کدهای شبکه مورد نیاز تونسسی آنالیز کرده ایم [19]. به این منظور، ما اتصال کوتاه سه فازی را در یک شین شبکه معمولی انتقال ۵۲ اعمال کردیم. همچنین، ما شین ۵۲ شبکه را بعنوان یک شین خطادار انتخاب کردیم زیرا شین اصلی برای توزیع برق به بقیه شبکه می باشد. یک (نقص) اتصال کوتاه سه فازی در زمان 5 s اعمال شد.



شکل ۶: نمایه بزرگی ولتاژ شبکه توزیع تونس (الف) با PVPP و (ب) بدون PVPP.

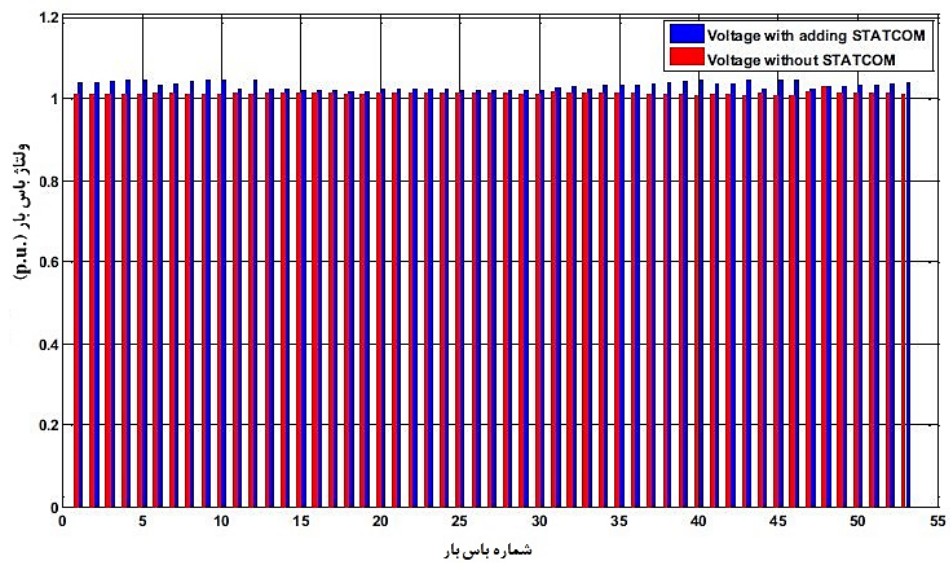


شکل ۷: کوچکترین مکان هندسی مقدار ویژه برای ماتریس ژاکوبین جریان بار استاتیک

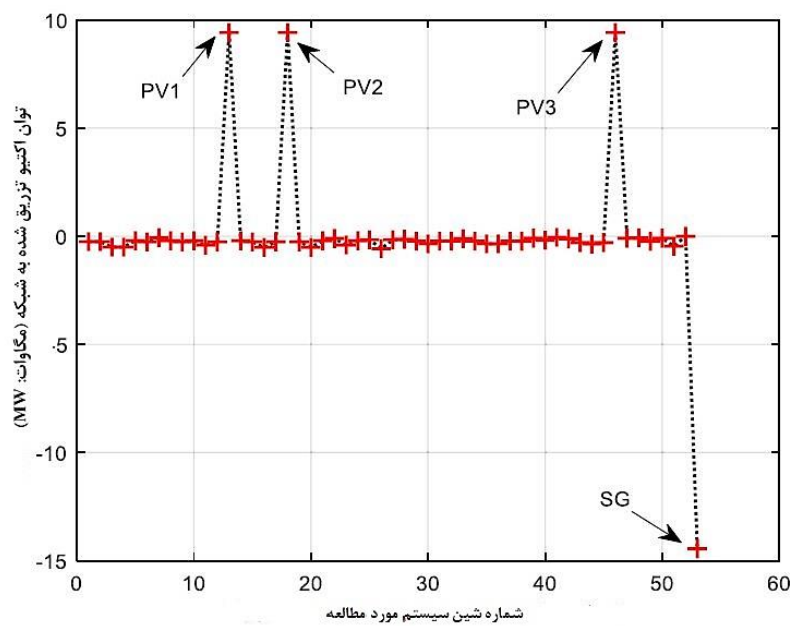
پس از ۱۵۰ میلی ثانیه، نقص پاک می شود تا کیفیت توان آزمایش شود و شبیه سازی ها با و بدون توان خورشیدی فتوولتایک برای مقایسه، اجرا گردیدند.

۱. گذر از خطا

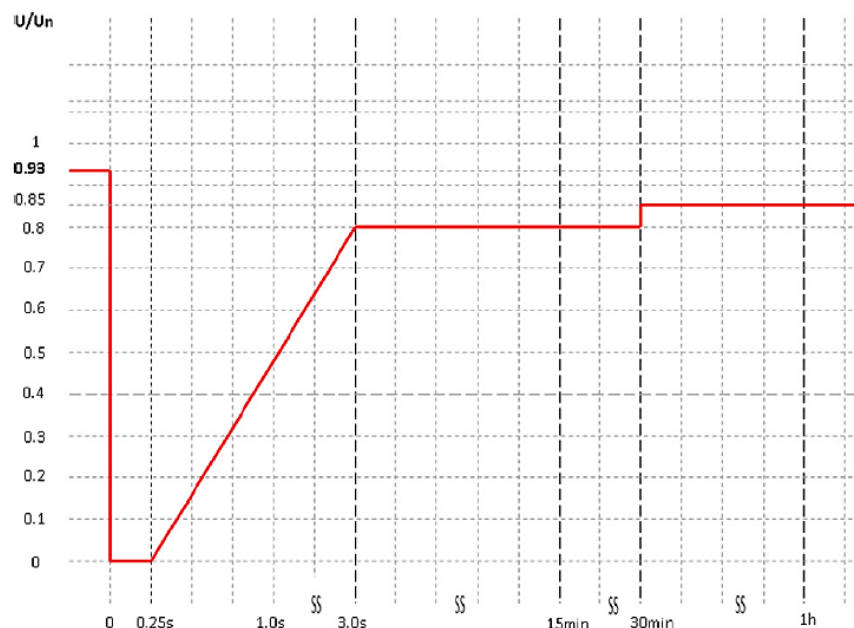
بر طبق شرکت گاز تونس، مشخصات ولتاژ حداقلی که مولدهای فتوولتایک خورشیدی باید در برابر آن مقاومت کنند به گونه ای است که در شکل ۱۰ ارائه شده است. این امر نشان می دهد که هر مولد فتوولتایک خورشیدی با پایداری گذرا، بدون بدتر شدن و با یک دوره ی رفع (نقص) خطای متوسط ۲۵۰ میلی ثانیه ای، به شبکه متصل باقی می ماند. در محدوده عملیاتی نیروگاه فتوولتایک خورشیدی، چنین خطاهایی نباید به ناپایداری یا انفصال (مجزاسازی) از شبکه انتقال منجر گردد. بعلاوه، شکل ۱۰ نشان می دهد که نیروگاه برق فتوولتایک خورشیدی باید قابلیت انجام عملیات مستمر و غیرمنقطع برای مدت زمان ۲۵۰ میلی ثانیه و یک افت ولتاژ تا صفر را داشته باشد.



شکل ۸: مقدار ولتاژ بزرگی (دامنه) باس بار شبکه توزیع تونسسی با و بدون معرفی STATCOM.



شکل ۹: توان اکتیو در نیروگاههای برق فتوولتائیک و در SG شین نوسانی.



شکل ۱۰: منحنی الزامات LVRT معمول برای شبکه برق تونس

این امر با بازیابی ولتاژ تا ۸۵٪ ولتاژ اسمی سیستم قدرت با مدت بازیابی ولتاژ ۳۰ دقیقه در نقطه ی اتصال مشترک، ردیابی می شود. در اینورترهای خورشیدی، قابلیت گذر از خطای ولتاژ پایین (LVRT) بمنظور حفظ پایداری سیستم بسیار لازم است.

تحت عملیات غیرعادی، مدت زمان بازیابی نیروگاه خورشیدی در جدول ۱ نشان داده شده است. محدوده های ولتاژهای شبکه به صورت در سیستم واحد، تعریف می گردند.

جدول ۱: الزامات نیروگاه برق خورشیدی با توجه به تغییرات ولتاژ شبکه [5].

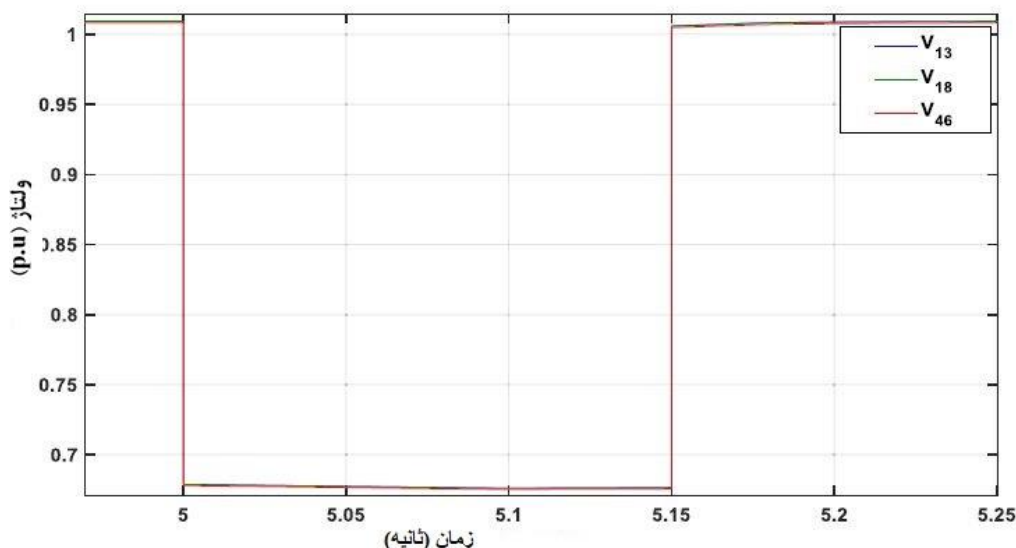
الزامات	محدوده های ولتاژ
۳۰ دقیقه	$0.8U_n - 0.85 U_n$
۳ ساعت	$0.85 U_n - 0.95 U_n$
نامحدود	$0.95 U_n - 1.05 U_n$
یک ساعت	$1.05 U_n - 1.1 U_n$
۱۵ دقیقه	$1.1 U_n - 1.2 U_n$

۲. اتصال- کوتاه شبکه بدون نیروگاه برق فتوولتاییک (PVPP)

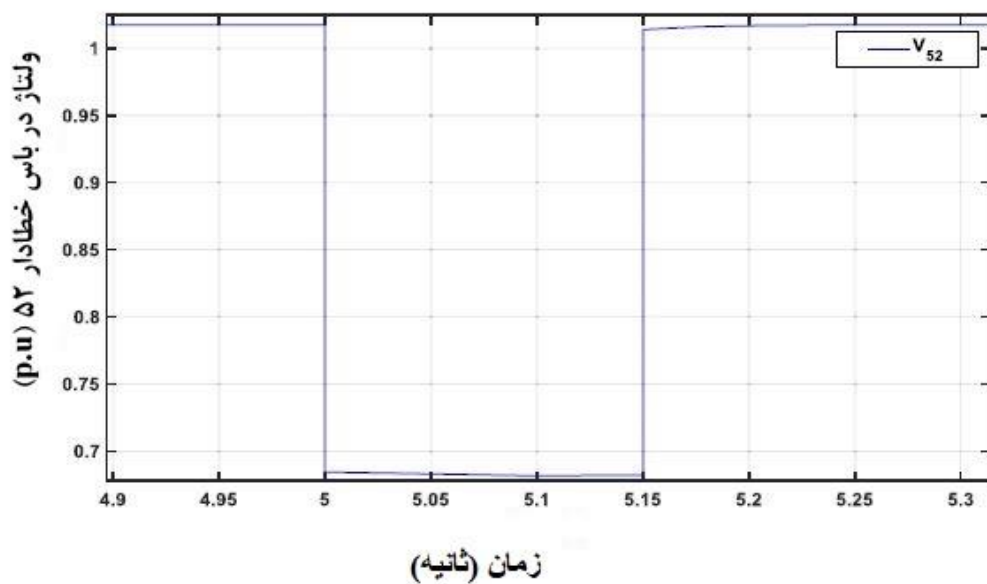
برای این اولین آزمایش، شبکه برق بدون مزرعه های نیروگاه برق فتوولتاییک (PVPP) شبیه سازی می شود. نمایه های ولتاژ حاصل در اتصال شین های PVPP های ۱۳، ۱۸ و ۴۶ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ما توانستیم افت معناداری را در ولتاژ در شین های اتصال مشاهده کنیم که به 0.65 بر واحد (p.u.) می رسد و در باس خطادار ۵۲ تا 0.70 p.u. افت پیدا می کند، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۳. اتصال- کوتاه شبکه با PVPP

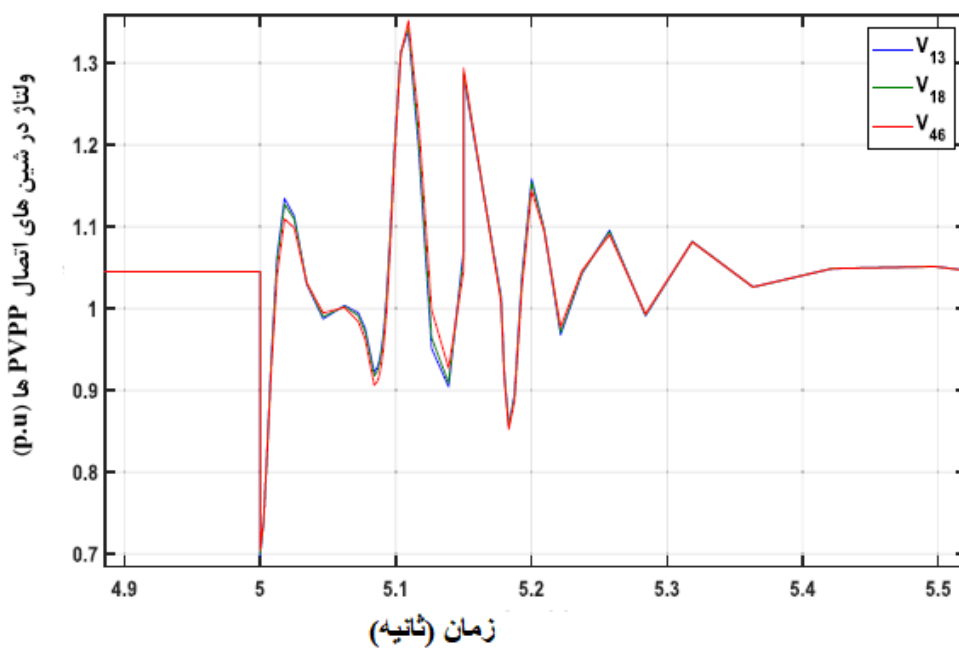
برای آزمایش دوم، شبکه توزیع با مزرعه های فتوولتاییک شبیه سازی می شود. ما خطا را در شین اتصال '۵۲' اعمال می کنیم. شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نشان دهنده رفتار PVPP ها و شین خطادار '۵۲' در حین گذر از خطا می باشند. دیده می شود که بعد از رخ دادن خطا، ولتاژ در شین های فتوولتاییک به سرعت تا نزدیک به 0.7 p.u. کاهش می یابد و با رفع خطا در 5.150 ثانیه، هنگامیکه PVPP یک ولتاژ حالت تنظیم را آغاز می کند ، ولتاژ پایانه ای فتوولتاییک شروع به افزایش می کند تا به 1.3 p.u. برسد.



شکل ۱۱: پاسخ ولتاژ بر حسب p.u. در شین های اتصال PVPP ها در مدت زمان اتصال- کوتاه سیستم بدون فتوولتاییک.

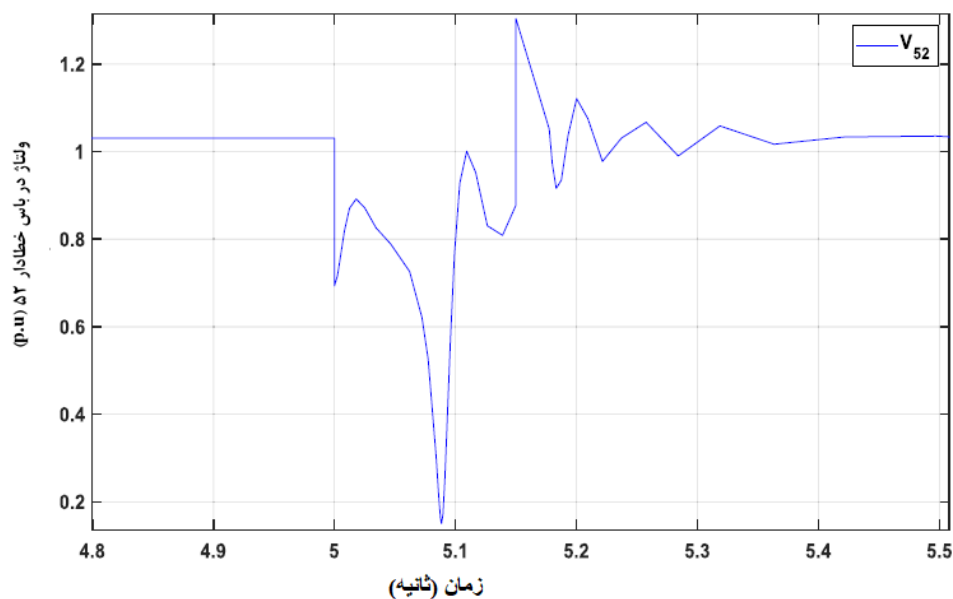


شکل ۱۲: پاسخ ولتاژ بر حسب p.u در باس اتصال خطادار ۵۲ در مدت زمان اتصال-کوتاه سیستم بدون فتوولتاییک.



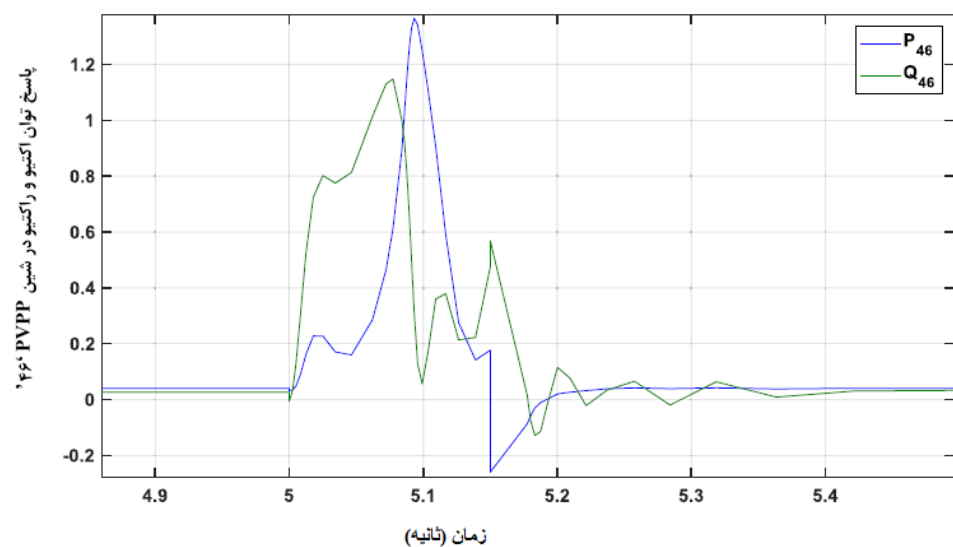
شکل ۱۳: پاسخ ولتاژ بر حسب p.u در شین های اتصال PVPP ها در مدت زمان اتصال-کوتاه سیستم با

فتوولتاییک و بدون STATCOM.



شکل ۱۴: پاسخ ولتاژ بر حسب p.u در باس اتصال خطادار ۵۲ در مدت زمان اتصال-کوتاه سیستم با فتوولتایک و

بدون STATCOM.



شکل ۱۵: پاسخ توان اکتیو و راکتیو بر حسب p.u در شین '۴۶' PVPP در مدت زمان خطا سیستم با فتوولتایک

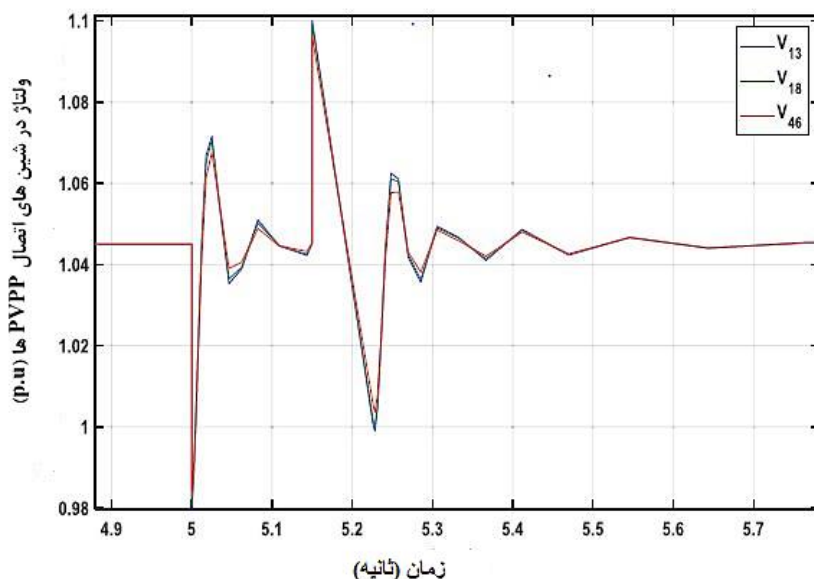
و بدون STATCOM

تولید توان اکتیو و راکتیو شین '۴۶' فتوولتایک در شکل ۱۵ ترسیم شده است. تنظیم ولتاژ در این مولد فتوولتایک مورد اطمینان است زیرا مولدهای فتوولتایک بوسیله یک کنترل کننده ساده و پیوسته بر طبق [5] گسترده شده اند. تولید توان راکتیو شین '۴۶' فتوولتایک ترسیم شد تا پشتیبانی ولتاژ را در طول دوره ولتاژ-پایین فراهم آورد، همانطور

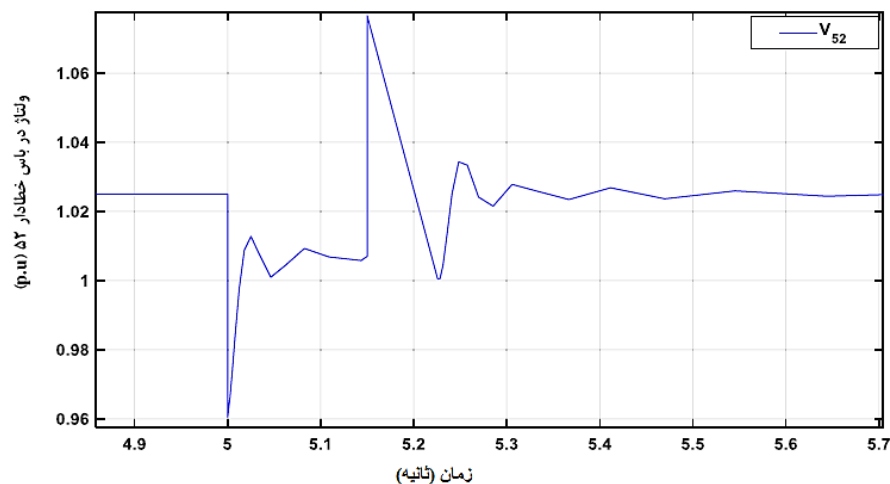
که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شین '۴۶' فتوولتاییک در پشتیبانی از ولتاژ شبکه بیشترین کمک را می کند زیرا نزدیکترین شین فتوولتاییک به باس یا شین خطدار است. در حین فرآیند گذرا، توان فعال تولید شده از نیروگاه برق خورشیدی در نتیجه اتصال کوتاه کاهش یافت. نتایج شبیه سازی این واقعیت را تایید می کنند که کنترل کننده های مولد فتوولتاییک این قابلیت را دارند تا ولتاژ پایانه ای فتوولتاییک را پس از رفع خطای اتصال کوتاه، دوباره برقرار سازند.

۴. شبیه سازی STATCOM با شبکه انتقال در مدت اتصال-کوتاه

ولتاژها در شین های PVPP ها و باس خطدار '۵۲' با STATCOM در سرتاسر آنالیز اتصال-کوتاه، به ترتیب در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. واضح است که جبران var استاتیک توانسته افت ناگهانی ولتاژ را هم در شین های PVPP ها و هم در باس خطدار ۵۲ کنترل نماید. علاوه بر این، افزایش ولتاژ در شین ۵۲ زیادتر است، زیرا که نقطه اتصال STATCOM می باشد. رفتار دینامیکی STATCOM ولتاژهای شبکه را تحت تاثیر قرار می دهد، اما این اثر مخرب نیست و بلافاصله پس از رفع خطا می باشد.



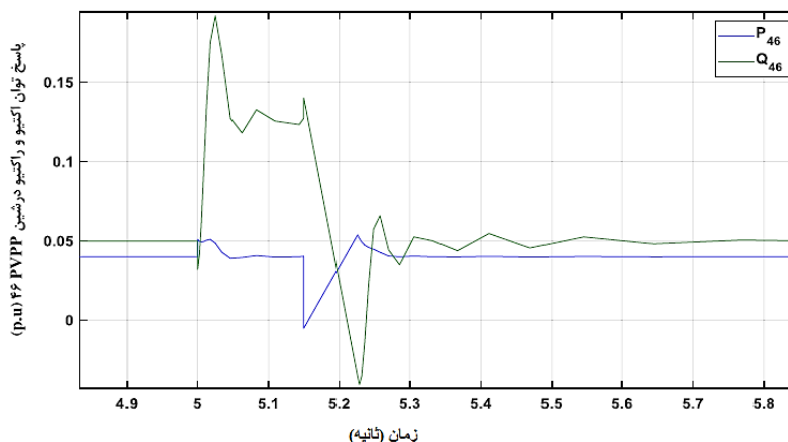
شکل ۱۶: پاسخ ولتاژ بر حسب p.u در شین های اتصال PVPP ها در مدت زمان اتصال-کوتاه سیستم با فتوولتاییک و با STATCOM.



شکل ۱۷: پاسخ ولتاژ بر حسب p.u در باس اتصال خطدار ۵۲ در مدت زمان اتصال-کوتاه سیستم با فتوولتاییک و با

STATCOM

شکل ۱۸ تامین توان راکتیو STATCOM در محیط های امن و دینامیک بمنظور به حداقل رساندن افت ولتاژ، را نمایش می دهد. تامین توان راکتیو پس از رفع خطا کاهش می یابد. به منظور حفظ کردن ولتاژ شین ثابت جریان-مستقیم (DC)، STATCOM توان اکتیو را مصرف کرده و اشاره می کند که توان اکتیو، با افزایش یافتن تامین توان راکتیو، کاهش پیدا می کند. مشاهده می شود که وجود STATCOM میزان ولتاژ را به سمت مقدار اسمی آن پایین می آورد.



شکل ۱۸: پاسخ توان اکتیو و راکتیو بر حسب p.u در شین ۴۶ PVPP در مدت زمان خطا سیستم با فتوولتاییک و با

STATCOM

شبکه توزیع که در ایالت Hammam-Lif که در شمال تونس در نزدیکی ساحل مدیترانه قرار دارد و دارای نفوذ فتوولتاییک ۱۲ مگاوات می باشد، مورد مطالعه قرار گرفت. یک نفوذ فتوولتاییک مقیاس بزرگ شامل STATCOM به سیستم قدرت به ترتیب به شین های ۱۳، ۱۸ و ۴۶ متصل شده، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. پلتفرم نرم افزار MATLAB استفاده شد و شبکه قدرت توسط یک مجموعه از معادلات جبری و دیفرانسیل، از شرایط اولیه روش جریان توان استاتیکی، توصیف شد. نتایج شبیه سازی با هدف آنالیز تاثیر STATCOM و مزرعه های فتوولتاییک بر پایداری گذرای سیستم قدرت بود. STATCOM جریان را کنترل می کند تا با توان راکتیو برخورد کند، زیرا ولتاژ در نقطه ی اتصال مشترک برای محاسبه متغیرهای کنترل بسیار معنی دار و مهم است. STATCOM تاثیر بسزایی در کاهش میزان اضافه ولتاژ به سمت مقدار اسمی آن در شین فتوولتاییک و به حداقل رساندن تلفات توان راکتیو، در سیستمی که شامل تولید فتوولتاییک زیاد با اختلال (انقطاع) خطا بود، داشت. بر خلاف این واقعیت که ولتاژ وارد شده بیشتر از ولتاژ مرجع بود، اینورتر فتوولتاییک در ولتاژ اسمی خود ثابت نگه داشته شد، در نتیجه پایداری سیستم را بهبود بخشید. مشاهده شده است که وجود STATCOM ولتاژ را پایین می آورد.

۵. نتیجه گیری

این مقاله تاثیر ادغام و یکپارچه سازی فتوولتاییک بر پایداری ولتاژ شبکه توزیع با ۵۳ شین را بررسی نمود. بازدهی و کیفیت ولتاژ در سیستم فتوولتاییک به دلیل ناپایداری ولتاژ در سیستم متصل به شبکه، افت پیدا می کند. برای غلبه بر این مشکل، STATCOM برای بهبود بخشیدن به کیفیت توان و پایداری ولتاژ سیستم قدرت تحت سناریوهای مختلف بر اساس کد شبکه تونس پیاده سازی شده است. STATCOM جایگزین های بهتری بمنظور افزایش حاشیه پایداری ولتاژ استاتیکی و قابلیت انتقال توان می دهد. STATCOM همچنین اجرا شد تا توان PQ تزریق شده به شبکه انتقال قدرت را تنظیم نماید. در این مقاله، ما همچنین بعضی مدل های مناسب برای STATCOM در آنالیز حالت پایا را همراه با بحثی دقیق و موشکافانه ارایه کردیم. بنابراین، ما یک روش برای شناسایی مکان بهینه افزاره های FACTS بدست آورده ایم. معادلات مربوطه نیز مشتق شده اند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که بهبود معناداری در این پارامترها و پایداری حالت پایای سیستم با گنجاندن STATCOM بوجود می آید.

References

- [2] Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2020 [Online]. Available: <http://www.ren21.net>
- [3] Martins J, Spataru S, Sera D, Stroe D-I, Lashab A. Comparative study of ramp-rate control algorithms for PV with energy storage systems. *Energies* 2019;12:1342.
- [4] Luthander R, Lingfors D, Widén J. Large-scale integration of photovoltaic power in a distribution grid using power curtailment and energy storage. *Sol. Energy* 2017;155:1319–25.
- [5] Saidi Abdelaziz Salah. Impact of large photovoltaic power penetration on the voltage regulation and dynamic performance of the Tunisian power system. *Energy Explor Exploit* 2020;38(5):1774–809. doi: <https://doi.org/10.1177/0144598720940864>.
- [6] Hu J, Zhu J, Dorrell DG. Model predictive control of grid-connected inverters for PV systems with flexible power regulation and switching frequency reduction. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2015;51:587–94.
- [7] Abdelaziz Saidi, Slimene Marwa Ben, Khlifi Mohamed Arbi, Azeem Mohammad Fazle, Ahmadi Salah Al, Draou Azzedine, et al. Analysis and study of twodimensional parameter bifurcation of wind power farms and composite loads. *Wind Energy. Wiley Journal* 2019;22(9):1243–59. doi: <https://doi.org/10.1002/we.2353>.
- [8] Daniel Noel, Felipe Sozinho, Dwight Wilson, Kenan Hatipoglu. Analysis of Large Scale Photovoltaic Power System Integration into the Existing Utility Grid Using PSAT. 978-1-5090-2246-5/16/\$31.00 2016 IEEE.
- [9] Kamala Devi V, Dr. Bisharathu Beevi A, Dr. Ramaier S. Impact of Solar Distributed Generation on Lt Grid of Kerala. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2015, Vol. 5, Iss. 12, pp. 254-264.
- [10] Tyll Heinz K, Frank Schettler. Power system problems solved by FACTS devices. Power systems conference and exposition. PSCE '09. IEEE/PES 2009; ISBN.
- [11] Kirschner L, Retzmann D, Thumm G. Benefits of FACTS for power system enhancement. IEEE/PES transmission and distribution conference & exhibition 2005: Asia and Pacific Dalian, China. ISBN: 0-7803-9114-4, doi: 10.1109/TDC. 2005.1547153.
- [12] Ahsan Shahid. Smart grid integration of renewable energy systems. 2018 int. conf. (ICRERA), France, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566827.
- [13] Rahmani-andebili M. Simultaneous placement of DG and capacitor in distribution network. *Electr Power Syst Res*. 2016;131:1–10.
- [14] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, Vitelli M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Trans. Power Electron.* July 2005;20(4):963–73.
- [15] Yorino N, El-Araby EE, Sasaki H, Harada S. A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse. *IEEE Trans. Power Syst.* 2003;18:3–10.
- [16] Gasperic S, Mihalic R. The impact of serial controllable FACTS devices on voltage stability. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2015;64:1040–8.
- [17] Gasperic S, Mihalic R. Estimation of the efficiency of FACTS devices for voltage stability enhancement with PV area criteria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019;105:144–56.
- [18] Saidi Abdelaziz Salah, Slimene Marwa Ben, Khlifi Mohamed Arbi. Transient Stability Analysis of Photovoltaic System with Experimental Shading Effects. *Engineering Technology & Applied Science Research (ETASR)* 2018;8 (6):3592–7.
- [19] Abdelaziz Saidi, Mushaf E. and Khadija Ben Kilani. Assessment of PV Systems Stability under Temperature Variation. The 9th IEEE International Renewable Energy Congress (IREC) 22-25 March 2018
- [20] Saidi Abdelaziz Salah, Helmy Walid. Artificial neural network-aided technique for low voltage ride-through wind turbines for controlling the dynamic behavior under different load conditions. *Wind Eng* 2019;43(4):420–40. doi: <https://doi.org/10.1177/0309524X18791387.9>.
- [21] Abdelaziz Saïdi, Khadija Ben Kilani, Chokri Bouchoucha, Mohamed Elleuch. Voltage Regulation and Dynamic Performance of the Tunisian Power System with Wind Power Penetration. *Trends in Applied Sciences. Research*. 2011;6 (8):813–31.
- [22] Saïdi Abdelaziz and Mohamed Ibrahim Y. Al-Rayif. Impact of Static and Dynamic Load Model on the Low Voltage Ride-Through of the Doubly-Fed Induction Generator Wind Farm. *WSEAS Transactions on Power Systems*, ISSN / E-ISSN: 1790-5060 / 2224-350X, Volume 12, 2017, Art. #1, pp. 1-10.
- [23] Bouchoucha Chokri, Abdelaziz Saïdi, Mimouni MN, Mansouri F. Effect of Dynamic and Static Load in the Voltage Stability. *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)* 2012;5(5):2214–27.

- [25] Abdelaziz Saïdi, Khadija Ben Kilani, Mohamed Elleuch. Impact of Large Scale Photovoltaic Generation on Voltage Stability in Distribution Networks. *European. Journal of Electrical Engineering*. 2016;18(1-2).
- [26] Bouhadouza B, Bouktir T, Bourenane A. Transient Stability Augmentation of the Algerian South-Eastern Power System including PV Systems and STATCOM. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2020;10 (3):5660–7.
- [27] Reza Baghaee Hamid, Mirsalim Mojtaba, Gharehpetian Gevorg B, Ali Heidar. A Decentralized Power Management and Sliding Mode Control Strategy for Hybrid AC/DC Microgrids including Renewable Energy Resources. *IEEE Trans Ind Inf* 2018.
- [28] Sultan Hamdy M, Zaki Diab Ahmed A, Kuznetsov Oleg N, et al. Evaluation of the Impact of High Penetration Levels of PV Power Plants on the Capacity, Frequency and Voltage Stability of Egypt's Unified. Grid. *Energies*. 2019;12: 552.
- [29] Feilat EA, Azzam S, Al Salaymeh A. Impact of Large PV and Wind Power Plants on Voltage and Frequency Stability of Jordan's National Grid. *Sustain. Cities Soc*. 2018;36:257–71.
- [30] Pillai Gobind, Husain, Naser Yaqoob. Assessing the technical impact of integrating large scale photovoltaics to the electrical power network of Bahrain. *Sustainable Energy Technol Assess* 2017;20:78–87.
- [31] Schinke A, Erlich I. Enhanced Voltage and Frequency Stability for Power Systems with High Penetration of Distributed Photovoltaic Generation. *IFAC Papers OnLine* 2018;51–28:31–6.
- [32] Kim S, Kang B, Bae S, et al. Application of SMES and grid code compliance to wind/photovoltaic generation system. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2013;23:5000804.
- [33] Tamimi B, Cañizares C, Bhattacharya K. Modeling and performance analysis of large solar photovoltaic generation on voltage stability and inter-area oscillations. In *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [34] Ruiz A. System Aspects of Large Scale Implementation of a Photovoltaic Power Plant. MSc Thesis, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden. 2011.
- [35] Salah Saidi Abdelaziz. Investigation of Structural Voltage Stability in Tunisian Distribution Networks Integrating Large-Scale Solar Photovoltaic Power Plant. *International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)*. 2020;30(13):1–24. doi: <https://doi.org/10.1142/S0218127420502594>.
- [36] Uzum Busra, Onen Ahmet, Hasanien Hany M, Muyeen SM. Rooftop Solar PV Penetration Impacts on Distribution Network and Further Growth Factors –. A Comprehensive Review”, *Electronics*, Jan. 2021;10(1):1–31.
- [37] Soliman Mahmoud A, Hasanien Hany M, Alkuhayl Abdulaziz. Marine predators algorithm for parameters identification of triple-diode photovoltaic models. *IEEE Access* September 2020;8:155832–42.
- [38] Selem Sameh I, El-Fergany Attia A, Hasanien Hany M. Artificial electric field algorithm to extract nine parameters of triple-diode photovoltaic model. *Int J Energy Res* January 2021;45(1):590–604.
- [39] Hany M. Hasanien “Performance improvement of photovoltaic power systems using an optimal control strategy based on whale optimization algorithm”. *Electr Power Syst Res* April 2018;157:168–76.
- [40] Qais Mohammed H, Hasanien Hany M. Saad Alghuwainem “Transient search optimization for electrical parameters estimation of photovoltaic module based on datasheet values”. *Energy Convers Manage* June 2020;214 (112904):1–9.
- [41] Abdelaziz Salah S et al. A Novel Approach in Stand-Alone Photovoltaic System using MPPT Controllers & NNE. *Ain Shams Engineering Journal* 2021;12 (2):1973–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.006>.