



Research Article

Smart Control of Photovoltaic Static Compensator System Based on Fuzzy Logic Control to Improve Voltage Stability**Ali Dalirian, Ph.D. Student, Alireza Solat, Assistant Professor, Seyed Mohammad Javad Rastegar Fatemi, Assistant Professor**Department of Electrical Engineering, College of Electrical Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.
iranvolta.co@gmail.com, alireza.solat@iau.ac.ir, rastegar.fatemi@gmail.com**Abstract**

This paper proposes a new fuzzy control for photovoltaic static compensator (PV-STATCOM) system in order to improve voltage stability. The task of proposed system is the dynamic voltage control of a solar PV system connected to load bus in different operating modes as STATCOM and/or PV active power generation. In this strategy, in case of perturbation, the proposed fuzzy controller by detecting it and considering the severity of disturbance, when there is no or insufficient remaining capacity of the inverter to compensate the reactive power, stops the active power production of the PV solar system, and then the entire capacity of the inverter is used as a STATCOM to regulate the voltage at the load bus. Then, after fixing the problem, the system returns to the active power generation mode as before. To evaluate the performance of the proposed fuzzy controller, different modes are simulated with EMTDC/PSCAD software to prove the ability of the controller to improve the stability of the power system. The results confirm that the PV-STATCOM with the proposed controller can improve the dynamic performance of the system.

Keywords: photovoltaic system, smart control, static compensator mode, voltage stability**Received:** 22 January 2023**Revised:** 1 March 2023**Accepted:** 22 April 2023**Corresponding Author:** Dr. Alireza Solat

Citation: A. Dalirian, A.R. Solat, S.M.J. Rastegar-Fatemi, "Smart control of photovoltaic static compensator system based on fuzzy logic control to improve voltage stability", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 60, pp. 119-134, January 2024 (in Persian).

کنترل هوشمند سیستم جبران‌کننده استاتیکی فتوولتائیک بر پایه منطق فازی به منظور بهبود پایداری ولتاژ

علی دلیریان، دانشجوی دکتری، علیرضا صولت، استادیار، سید محمدجواد رستگار فاطمی، استادیار

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران
iranvolta.co@gmail.com, alireza.solat@iau.ac.ir, rastegar.fatemi@gmail.com

چکیده: این مقاله یک کنترل فازی جدید برای سیستم فتوولتائیک مبتنی بر جبران‌کننده سنکرون استاتیکی (PVSTATCOM) به منظور بهبود پایداری ولتاژ پیشنهاد می‌کند. سیستم پیشنهادی وظیفه کنترل ولتاژ دینامیکی سیستم خورشیدی PV متصل شده به باس بار را در حالت‌های عملیاتی مختلف به عنوان STATCOM و/یا تولید توان اکتیو PV بر عهده دارد. در این استراتژی، هنگام بروز اختلال، کنترل‌کننده فازی پیشنهادی با تشخیص آن و با توجه به شدت اغتشاش، در صورت عدم وجود یا ناکافی بودن ظرفیت باقیمانده اینورتر برای جبران‌سازی توان راکتیو، تولید توان اکتیو سیستم خورشیدی را متوقف می‌کند و از اینورتر آن به طور کامل به عنوان STATCOM، برای تنظیم ولتاژ در باس بار، استفاده می‌کند. پس از رفع اختلال، سیستم به حالت تولید توان اکتیو مانند قبل از اختلال باز می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده فازی پیشنهادی، حالت‌های مختلفی با نرم‌افزار EMTDC/PSCAD شبیه‌سازی شده‌اند تا توانایی کنترل‌کننده برای بهبود پایداری سیستم قدرت را به اثبات برسانند. نتایج تأیید می‌کند که PV-STATCOM با کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند عملکرد دینامیکی سیستم را بهبود بخشد.

کلمات کلیدی: پایداری ولتاژ، حالت جبران‌کننده استاتیکی، سیستم فتوولتائیک، کنترل هوشمند

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا صولت

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

۱- مقدمه

به دلایل زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ برای تولید برق به سرعت در حال افزایش است. منابع انرژی تجدیدپذیر برخلاف سوخت‌های فسیلی بی‌پایان هستند و برای سالیان متمادی و نسل‌های آینده قابل استفاده خواهند بود. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک^۲ (PV) متصل به شبکه سریع‌ترین شتاب رشد را دارند [۱-۳]. ورود مزارع فتوولتائیک^۳ به سیستم قدرت مزایای زیادی دارد. با توجه به نتایج مطالعات محققین در رابطه با ادغام سیستم‌های PV در شبکه، بررسی و تحلیل رابطه بین حضور گسترده این منابع و مشکل پایداری سیستم قدرت ضروری به نظر می‌رسد [۴-۷].

در میان مسایل پایداری، ناپایداری ولتاژ^۴ یکی از نگرانی‌های اصلی سیستم قدرت بوده است. ثابت شده است که جبران ناکافی توان راکتیو در شرایط عملیاتی می‌تواند منجر به ناپایداری ولتاژ شود و یا به عبارت دیگر، ناپایداری ولتاژ در سیستمی رخ می‌دهد که در آن در هنگام بارگذاری سنگین^۵ و اختلالاتی مانند خطاها، توان راکتیو کم است [۸-۱۳]. کنترل ولتاژ و جبران‌سازی توان راکتیو دو عملکرد مهم در مورد کنترل‌کننده‌های سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر متناوب^۶ (FACTS) در سیستم‌های قدرت مدرن هستند. جبران‌کننده سنکرون ایستا^۷ (STATCOM) یکی از جبران‌سازهای موازی^۸ FACTS است که دارای مزیت‌هایی مانند، قابلیت تزریق و جذب توان راکتیو به همراه پاسخ دینامیکی بسیار سریع است و می‌تواند نقش مهمی را در جبران‌سازی توان راکتیو^۹ داشته باشد [۱۴].

از چند سال گذشته، دانشمندان و مهندسان در حال تحقیق در جهت چگونگی استفاده از اینورتر سیستم‌های خورشیدی فعلی برای استفاده به عنوان تنظیم‌کننده ولتاژ مانند STATCOM، برای تنظیم ولتاژ شبکه بودند. با اضافه کردن کنترل‌کننده‌های اضافی به کنترل‌کننده‌های متداول در سیستم خورشیدی فتوولتائیک می‌توان از آن به عنوان STATCOM استفاده کرد. بنابراین مزرعه‌های خورشیدی فتوولتائیک می‌تواند در شبکه توزیع، ولتاژ باسی که به آن متصل است را مانند STATCOM تنظیم کند، از این‌رو به آن سیستم، فتوولتائیک مبتنی بر جبران‌کننده سنکرون استاتیکی^{۱۰} (PV-STATCOM) نیز می‌گویند [۱۵]. استفاده از مزارع خورشیدی فتوولتائیک به عنوان STATCOM در مرجع [۱۶] پیشنهاد شده است.

با تغییرات بار، نوسانات دینامیکی در سیستم قدرت نیز افزایش می‌یابد. این نوسانات ممکن است در باس بار یا در یک نیروگاه رخ دهد. نوسانات دینامیکی توسط سیستم‌های کنترل مانند تثبیت‌کننده سیستم قدرت^{۱۱} (PSS) و سیستم کنترل فرکانس، در صورت رخ دادن نوسانات حل می‌شود، اما زمانی که نوسانات با دامنه زیاد در سیستم قدرت رخ می‌دهد، علاوه بر کنترل‌کننده‌های قدرت، وجود تجهیزات دیگر برای بهبود پایداری دینامیکی^{۱۱} بسیار موثر است [۱۷]. کاهش اضافه ولتاژ لحظه‌ای^{۱۲} (TOV) توسط PV-STATCOM در حضور خطاهای نامتقارن در مرجع [۱۸] ارائه شده است. کاهش میرایی نوسان قدرت^{۱۳} (POD) توسط PV-STATCOM در چندین سیستم قدرت در مرجع [۱۹] بررسی شده است. تأثیر PV-STATCOM در کاهش رزونانس زیر سنکرون^{۱۴} (SSR) در یک توربین بخار هنگامی که خط انتقال با خازن سری جبران می‌شود نیز در مرجع [۲۰] نشان داده شده است.

در این مقاله یک کنترل هوشمند بر پایه منطق فازی برای کنترل سیستم PV-STATCOM به منظور حفظ پروفایل ولتاژ باس بار در محدوده مجاز در شرایط اغتشاشات دینامیکی بار^{۱۵} ارائه گردیده و عملکرد آن با کنترل‌کننده‌های متداول مقایسه و ارزیابی شده است. برای این منظور عملکرد نیمه STATCOM که مطالعات کمتری روی آن انجام شده با تولید پیوسته توان اکتیو و راکتیو به صورت بهینه توسط کنترل فازی، مورد توجه قرار گرفته است. در این استراتژی، هنگام بروز اغتشاشات، کنترل‌کننده فازی پیشنهادی آن را تشخیص و با توجه به شدت آن میزان توان راکتیو و اکتیو تزریقی به سیستم را تعیین می‌کند. ضمن این که در صورت عدم وجود یا ناکافی بودن ظرفیت باقیمانده اینورتر به منظور جبران‌سازی توان راکتیو، تولید توان اکتیو سیستم خورشیدی را متوقف می‌کند و با تغییر حالت کارکرد سیستم خورشیدی، از کل ظرفیت اینورتر به عنوان STATCOM، برای تنظیم ولتاژ در باس بار، استفاده می‌کند. پس از رفع اختلال، سیستم خورشیدی به حالت تولید توان اکتیو مانند قبل از اختلال باز می‌گردد. ادامه این مقاله به این شرح است. سیستم قدرت مورد مطالعه در بخش دوم شرح داده شده است. در بخش سوم

۳- واحدهای کنترل سیستم فتوولتائیک مبتنی بر جبران کننده سنکرون استاتیکی

شکل (۱) واحدهای کنترل سیستم PV-STATCOM را نشان می‌دهد. سیستم PV-STATCOM شامل پنل‌های PV، اینورتر، فیلتر و واحد کنترل است. سیستم کنترل شامل کنترل کننده ولتاژ ac، کنترل کننده ولتاژ dc، کنترل کننده جریان^{۱۷} و بلوک‌های دیگر است که در نهایت پالس‌های اینورتر را فراهم می‌کند [۷]. وظیفه کنترل حالت‌های عملکرد PV-STATCOM بر عهده کنترل کننده هوشمند فازی است. واحدهای کنترل در ادامه اشاره شده است.

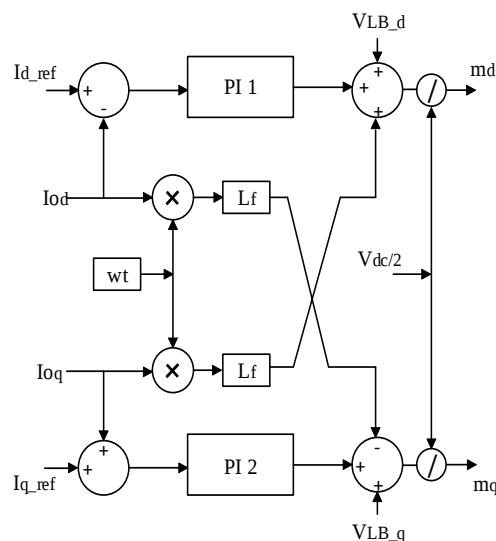
۳-۱- کنترل کننده جریان

اجزای کنترل کننده جریان در شکل (۲) نشان داده شده است. ولتاژ باس بار و ولتاژ لینک DC اینورتر به‌طور پیوسته اندازه‌گیری و با مقدار مرجع خود مقایسه می‌شوند و مقادیر مرجع I_{d-ref} و I_{q-ref} به عنوان ورودی کنترل کننده جریان، تولید می‌شوند. با مقایسه I_d و I_q با این مقادیر، سیگنال‌های خطا به دست می‌آیند. این سیگنال‌ها از یک کنترل کننده متناسب-انتگرال گیر (PI) عبور می‌کنند [۲۲-۲۴] و در نهایت پارامترهای m_d و m_q به دست می‌آیند، به عبارت دیگر مشخصات ولتاژ باس بار و ولتاژ DC تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی با عبور از کنترل کننده، تعیین کننده مشخصات سیگنال مرجع^{۱۸} m_d و m_q هستند. پس از تبدیل سیگنال‌های مرجع در چارچوب dq به سیگنال‌های سه فاز m_{abc} ، این سیگنال‌ها برای تولید پالس‌های IGBT، با سیگنال حامل مقایسه می‌شود [۷، ۲۵، ۲۶]. فرکانس موج حامل، فرکانس کلیدزنی IGBT-های اینورتر را تعیین می‌کند. این فرکانس برای اینورترهای منبع ولتاژی عموماً بین ۲ کیلوهرتز تا ۱۵ کیلوهرتز انتخاب می‌شود [۳۲]. مقدار فرکانس موج حامل تاثیری بر عملکرد کنترل کننده PV-STATCOM ندارد بلکه تاثیر آن بر روی تلفات کلیدزنی و همچنین ایجاد هارمونیک در شکل موج جریان و ولتاژ خروجی اینورتر است که برای حذف آن از فیلتر در خروجی اینورتر، قبل از اتصال به باس بار استفاده می‌گردد. در این مقاله به‌منظور کاهش تلفات کلیدزنی فرکانس موج حامل ۵ کیلوهرتز [۱۸] در نظر گرفته شده است. کنترل جریان وظیفه تنظیم سطح ولتاژ خروجی اینورتر را بر عهده دارد. توان اکتیو و راکتیو خروجی سیستم‌های PV-STATCOM در چارچوب dq به شرح زیر است [۱۸]:

$$P_o(t) = \frac{3}{2} (V_{lb_d}(t).I_{od}(t) + V_{lb_q}(t).I_{oq}(t)) \quad (۱)$$

$$Q_o(t) = \frac{3}{2} (-V_{lb_d}(t).I_{oq}(t) + V_{lb_q}(t).I_{od}(t)) \quad (۲)$$

که در آن i_{od} و v_{LB-dq} به ترتیب جریان خروجی سیستم PV-STATCOM و ولتاژ باس بار در چارچوب dq هستند. توان اکتیو خروجی اینورتر توسط i_{od} و توان راکتیو خروجی توسط i_{oq} کنترل می‌شوند [۱۸، ۲۱].



شکل (۲): بلوک کنترل جریان

Figure (2): Current-control block

به دلیل کم بودن جریان فیلتر موازی، جریان خروجی سیستم PV-STATCOM برابر با جریان اینورتر در نظر گرفته می‌شود. در سمت AC اینورتر سه فاز داریم:

$$V_{inv} = R_f \cdot I_{inv} + L_f \frac{dI_{inv}}{dt} + V_{lb} \quad (3)$$

ولتاژ سمت AC اینورتر به صورت زیر کنترل می‌شود:

$$V_{inv,abc} = \frac{V_{dc}}{2} m_{abc} \quad (4)$$

به طوری که V_{dc} و m_{abc} به ترتیب ولتاژ باس DC و شاخص مدولاسیون هستند. بنابراین، جریان اینورترها در چارچوب dq عبارتند از:

$$L_f \frac{dI_{inv,d}}{dt} = L_f \omega(t) \cdot I_{inv,q} - R_f \cdot I_{inv,d} + \frac{V_{dc}}{2} m_d - V_{lb_d} \quad (5)$$

$$L_f \frac{dI_{inv,q}}{dt} = -L_f \omega(t) \cdot I_{inv,d} - R_f \cdot I_{inv,q} + \frac{V_{dc}}{2} m_q - V_{lb_q} \quad (6)$$

به طوری که ولتاژ باس بار، $I_{inv,dq}$ جریان اینورتر، V_{dc} ولتاژ باس dc و m_{dq} شاخص‌های مدولاسیون در چارچوب dq هستند [۲۱]. به منظور خطی کردن (۵) و (۶):

$$L_f \frac{dI_{inv,d}}{dt} + R_f \cdot I_{inv,d} = u_d \quad (7)$$

$$L_f \frac{dI_{inv,q}}{dt} + R_f \cdot I_{inv,q} = u_q \quad (8)$$

شاخص‌های مدولاسیون به صورت زیر به دست می‌آید:

$$m_d = \frac{2}{V_{dc}} (u_d - L_f \omega(t) \cdot I_{inv,q} + V_{lb_d}) \quad (9)$$

$$m_q = \frac{2}{V_{dc}} (u_q - L_f \omega(t) \cdot I_{inv,d} + V_{lb_q}) \quad (10)$$

پس از تبدیل به چارچوب سه فاز m_d ، m_q با سیگنال حامل برای تولید پالس‌های IGBT مقایسه می‌شوند [۲۱].

۳-۲- کنترل کننده ولتاژ DC

شکل (۳) کنترل کننده ولتاژ dc را نشان می‌دهد. با استفاده از I_{pv} و V_{dc} به عنوان ورودی کنترل کننده، V_{dc_ref} توسط بلوک ردیابی نقطه حداکثر توان^{۱۹} (MPPT) تولید می‌شود. این مقدار با V_{dc} مقایسه شده و یک سیگنال خطا تولید می‌کند که پس از عبور از کنترل کننده PI جریان I_{q_ref} را تولید می‌کند [۲۰].

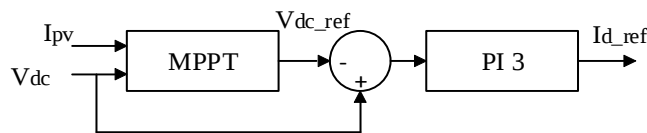
۳-۳- کنترل کننده ولتاژ

کنترل کننده ولتاژ دارای سه حالت عملیاتی به صورت زیر است:

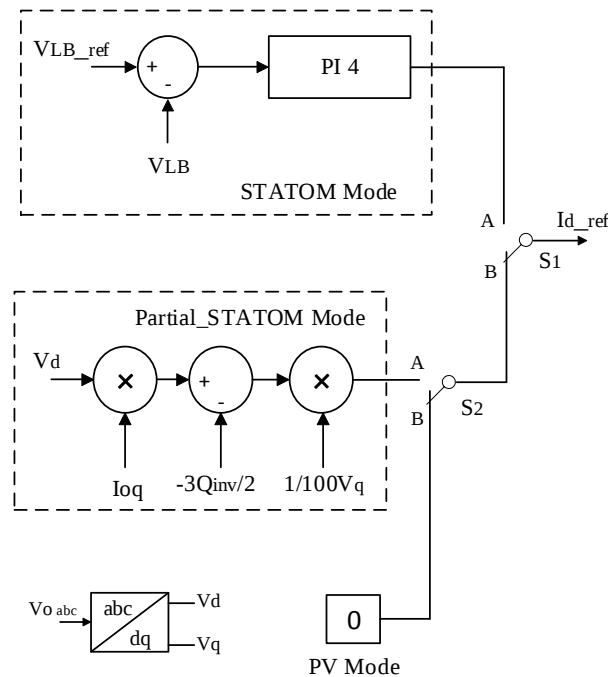
(۱) حالت PV: این حالت عملکرد عادی سیستم PV است و ولتاژ باس بار در محدوده قابل قبولی قرار دارد و نیازی به جبران توان راکتیو نیست، این حالت با سوئیچ کلیدهای S1 و S2 به موقعیت B فعال می‌شود [۱۸].

(۲) حالت STATCOM: این حالت عملکردی برای کنترل سطح ولتاژ در باس بار استفاده می‌شود [۲۱]. برای تبادیل توان راکتیو بین اینورتر و شبکه زمانی که اتصال بین پنل‌ها و اینورتر قطع می‌شود استفاده می‌شود. این حالت با تغییر "S1" به موقعیت "A" فعال می‌شود.

(۳) حالت نیمه STATCOM: این حالت عملیاتی برای کنترل ولتاژ زمانی که پنل‌ها به اینورتر متصل هستند و از ظرفیت باقیمانده اینورتر برای جبران توان راکتیو در باس بار استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این حالت با تغییر "S1" به موقعیت "B" و "S2" به موقعیت "A" فعال می‌شود [۲۴].



شکل (۳): واحد کنترل ولتاژ DC
Figure (3): DC voltage control unit



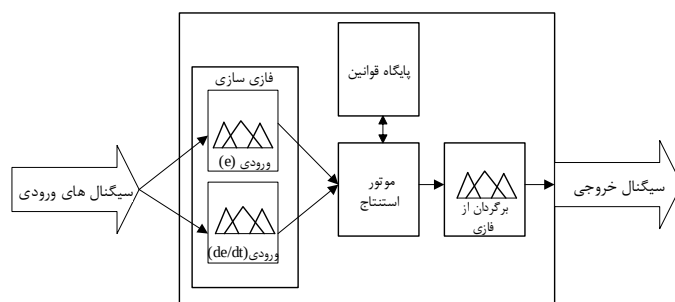
شکل (۴): واحد کنترل ولتاژ
Figure (4): Voltage control unit

در نهایت، با توجه به حالت انتخاب شده توسط کنترل فازی، جریان I_{d_ref} ایجاد می‌گردد. در شکل (۴) واحد کنترل ولتاژ سیستم PV-STATCOM نشان داده شده است.

۴-کنترل هوشمند پیشنهادی

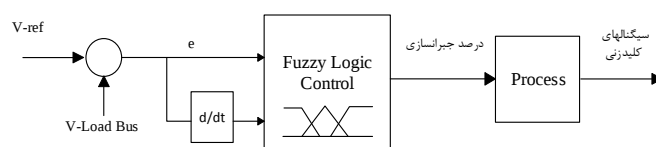
همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی که مبتنی بر منطق فازی است، به چهار بخش فازی‌سازی، قوانین، سیستم استنتاج و برگرداندن از فازی طبقه‌بندی می‌شود. رابط‌های فازی ورودی‌هایی را که توسط مکانیزم استنتاج استفاده می‌شود، فازی می‌کنند و یک مقدار عضویت را به تابع عضویت^{۲۰} در محدوده سیگنال ورودی اختصاص می‌دهد. سیستم استنتاج فازی^{۲۱} مبتنی بر ممدانی در جعبه ابزار منطق فازی مبتنی بر رابط کاربری گرافیکی موجود در متلب ساخته شده و با استفاده از مرجع [۲۷] در نرم افزار PSCAD/EMTDC پیاده‌سازی گردیده است. قوانین فازی از تجربیات عملی به‌منظور دستیابی به حداکثر عملکرد برای سیستم تعریف شده است. قوانین فازی به شکل IF (شرط) و THEN (عمل) نوشته می‌شوند. در نهایت با توجه به قوانین تعریف شده در پایگاه قوانین، برای مقادیر ورودی، تصمیم‌گیری می‌شود. تمام توابع عضویت مورد استفاده برای این شبیه‌سازی از نوع مثلثی هستند.

در ادامه کنترل هوشمند فازی به‌منظور انتخاب حالت‌های عملکردی مختلف PV-STATCOM برای تنظیم ولتاژ باس بار معرفی می‌گردد. کنترل‌کننده فازی دو ورودی خطا (e) و مشتق خطا (de) رابه عنوان ورودی [۲۸] دریافت می‌کند. خروجی کنترل‌کننده برحسب درصد خطا است که در قسمت فرآیند تبدیل به سیگنال‌های صفر و یک برای تغییر وضعیت کلیدها می‌گردد. کنترل‌کننده پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): ساختار کلی کنترل کننده فازی

Figure (5): General structure of the fuzzy controller



شکل (۶): ساختار کنترلر پیشنهادی

Figure (6): Structure of the proposed controller

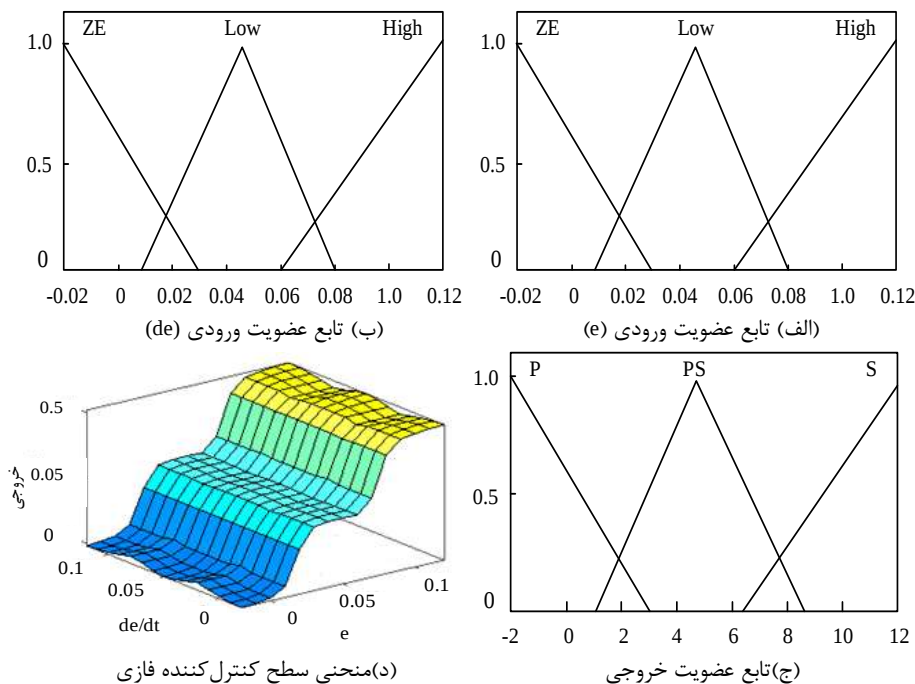
ابتدا ولتاژ در باس بار با ولتاژ مرجع مقایسه می‌گردد و سیگنال خطای e به دست می‌آید. با توجه به مقدار سیگنال به دست آمده، کنترل هوشمند فازی وظیفه انتخاب عملکرد سیستم خورشیدی را بین سه حالت (STATCOM یا STATCOM نیمه، PV، نیمه STATCOM) بر عهده دارد. در شرایطی که هیچ اختلالی (بار زیاد، خطا و غیره) وجود ندارد و نیازی به جبران توان راکتیو نیست، کنترل هوشمند سیستم را در حالت PV قرار می‌دهد. ظرفیت باقیمانده اینورتر^{۲۲} (Q_{rem}) بر اساس تابش خورشید با توجه به رابطه (۱۱) در هر مرحله محاسبه می‌شود [۲۹-۳۱].

$$Q_{inv} = \sqrt{(S_{inv})^2 - (P_{inv})^2} \quad (11)$$

که در آن S_{inv} ، P_{inv} ، Q_{inv} به ترتیب توان ظاهری، اکتیو و راکتیو اینورتر هستند. اگر اغتشاش یا افت ولتاژ به حدی باشد که توان راکتیو مورد نیاز کمتر از Q_{rem} باشد (یعنی $Q_{required} < Q_{rem}$)، کنترل هوشمند سیستم را در حالت نیمه STATCOM قرار می‌دهد و بدون ایجاد وقفه در تولید توان اکتیو، از ظرفیت باقیمانده آنها برای جبران توان راکتیو استفاده می‌شود. اگر اختلال به حدی باشد که توان راکتیو مورد نیاز بیشتر از ظرفیت باقیمانده سیستم‌ها باشد ($Q_{required} > Q_{rem}$)، سیستم باید در حالت STATCOM قرار بگیرد، با جدا کردن پنل‌های خورشیدی از اینورترها توسط کنترل هوشمند، کل ظرفیت اینورترها برای کنترل ولتاژ باس بار استفاده می‌شود ($Q_{inv} = S_{inv}$). همچنین قوانین منطق فازی استفاده شده در کنترل کننده به صورت زیر آورده شده و در آن با توجه به شرایط ورودی‌ها، خروجی مشخص می‌گردد:

Rule 1	IF (e is "ZE") AND (de/dt is "ZE") THEN (output is "P")
Rule 2	IF (e is "ZE") AND (de/dt is "Low") THEN (output is "P")
Rule 3	IF (e is "High") AND (de/dt is "High") THEN (output is "S")
Rule 4	IF (e is "ZE") AND (de/dt is "High") THEN (output is "P")
Rule 5	IF (e is "High") AND (de/dt is "Low") THEN (output is "S")
Rule 6	IF (e is "Low") AND (de/dt is "ZE") THEN (output is "PS")
Rule 7	IF (e is "Low") AND (de/dt is "Low") THEN (output is "PS")
Rule 8	IF (e is "High") AND (de/dt is "ZE") THEN (output is "S")
Rule 9	IF (e is "Low") AND (de/dt is "High") THEN (output is "PS")

به طوری که در آن ZE, Low, High به ترتیب بیانگر میزان جبران سازی صفر، کم، زیاد است و S، PS و P نیز به ترتیب بیانگر حالت‌های عملکردی کنترل کننده یعنی سه حالت PV، نیمه STATCOM و STATCOM هستند. در شکل (۷) توابع عضویت ورودی و خروجی و همچنین منحنی سطح کنترل کننده فازی که می‌توان از آن مقدار خروجی کنترل کننده در حالت‌های مختلف ورودی به دست آورد و رفتار کنترل کننده را بررسی کرد، آورده شده است.



شکل (۷): توابع عضویت ورودی و خروجی به همراه منحنی سطح کنترل کننده فازی

Figure (7): Input and output membership functions along with the surface curve of the fuzzy controller, (a) Input membership function (e), (b) Input membership function (de), (c) Output membership function, (d) Fuzzy controller surface curve

۵- نتایج و بحث

در این بخش، عملکرد کنترل هوشمند فازی پیشنهادی به منظور بهبود پایداری ولتاژ ارائه شده است. مدل سیستم مورد مطالعه در نرم افزار PSCAD/EMTDC در شکل (۸) نشان داده شده است. همچنین نتایج به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

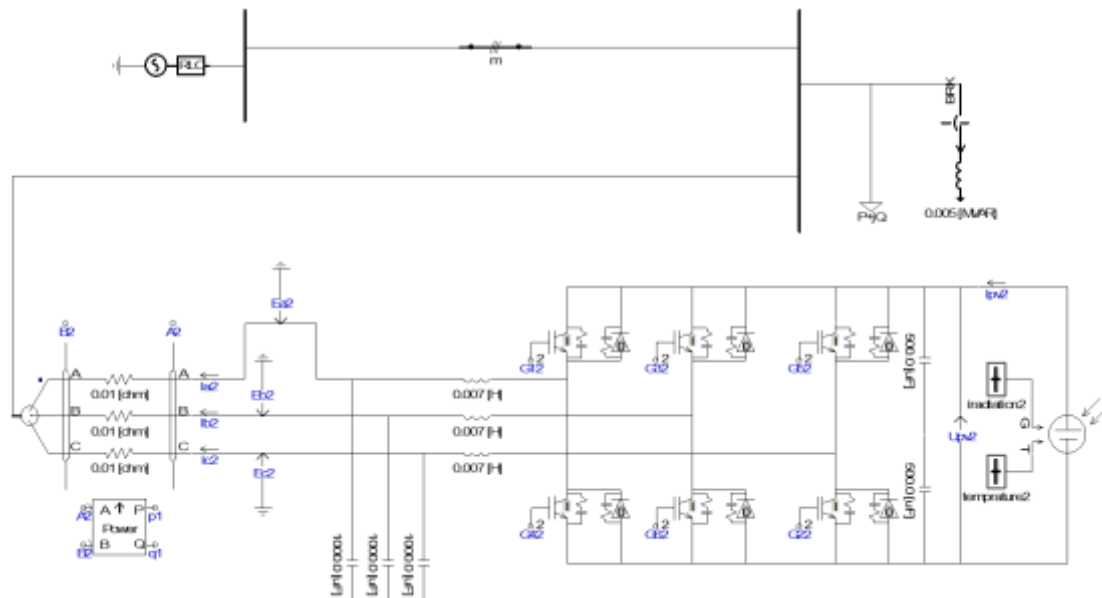
۵-۱- عملکرد کنترل کننده هوشمند فازی در بارهای مختلف

در این بخش عملکرد کنترل هوشمند در سیستم مورد مطالعه در بارهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. در حالت اول، یک بار ۲۵ کیلوواتی به باس بار متصل است، ولتاژ در محدوده مناسب قرار دارد و سیستم خورشیدی توان اکتیو ۴/۵ کیلووات را تولید می کند و نیازی به جبران سازی نیست، نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. اکنون علاوه بر بار ۲۵ کیلووات، بارهای ۵ کیلووات و ۹ کیلووات به ترتیب در بازه زمانی ۴/۵-۲ ثانیه به باس بار متصل می شوند. در مرحله اول با اتصال بار ۵ کیلووات، کنترل هوشمند با توجه به قوانین خود، سیستم را در حالت نیمه STATCOM قرار می دهد که پاسخ های این مرحله در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۰-الف) تا (۱۰-د) به ترتیب مقدار پریونیت ولتاژ باس بار بدون استفاده از کنترل کننده فازی پیشنهادی، ولتاژ با استفاده از کنترل پیشنهادی، توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط سیستم PV-STATCOM در بازه زمانی ۱ تا ۷ ثانیه هستند. همان طور که در شکل (۱۰-الف) ملاحظه می شود با اضافه شدن بار ۵ کیلووات در لحظه $t=2$ ثانیه، میزان دامنه ولتاژ از مقدار ۱ پریونیت به ۰/۹۴ پریونیت افت می کند. کنترل کننده فازی پیشنهادی با تشخیص افت ولتاژ و با توجه به این که سیستم خورشیدی در حداکثر تولید توان اکتیو خود نمی باشد، سیستم را در حالت نیمه STATCOM قرار می دهد و از ظرفیت باقیمانده اینورتر سه فاز برای تولید توان راکتیو استفاده می کند و با تزریق ۲/۵ کیلووات راکتیو به باس بار سیستم، ولتاژ را به مقدار ۱ پریونیت باز می گرداند. در مرحله دوم با اتصال بار ۹ کیلووات در لحظه ۲ ثانیه به باس بار، کنترل هوشمند فازی پیشنهادی، سیستم فتوولتائیک خورشیدی را به حالت عملکردی STATCOM تغییر می دهد، نتایج شبیه سازی در این مرحله، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به خروجی های این مرحله که در شکل های (۱۱-الف) تا (۱۱-د) آورده شده است، مشاهده می شود که با وصل بار ۹ کیلووات ولتاژ باس بار به مقدار ۰/۸۸ پریونیت کاهش می یابد. در این حالت میزان افت ولتاژ به قدری است که ظرفیت باقیمانده سیستم خورشیدی قادر به جبران سازی آن نیست. در این صورت کنترل فازی با قطع ارتباط

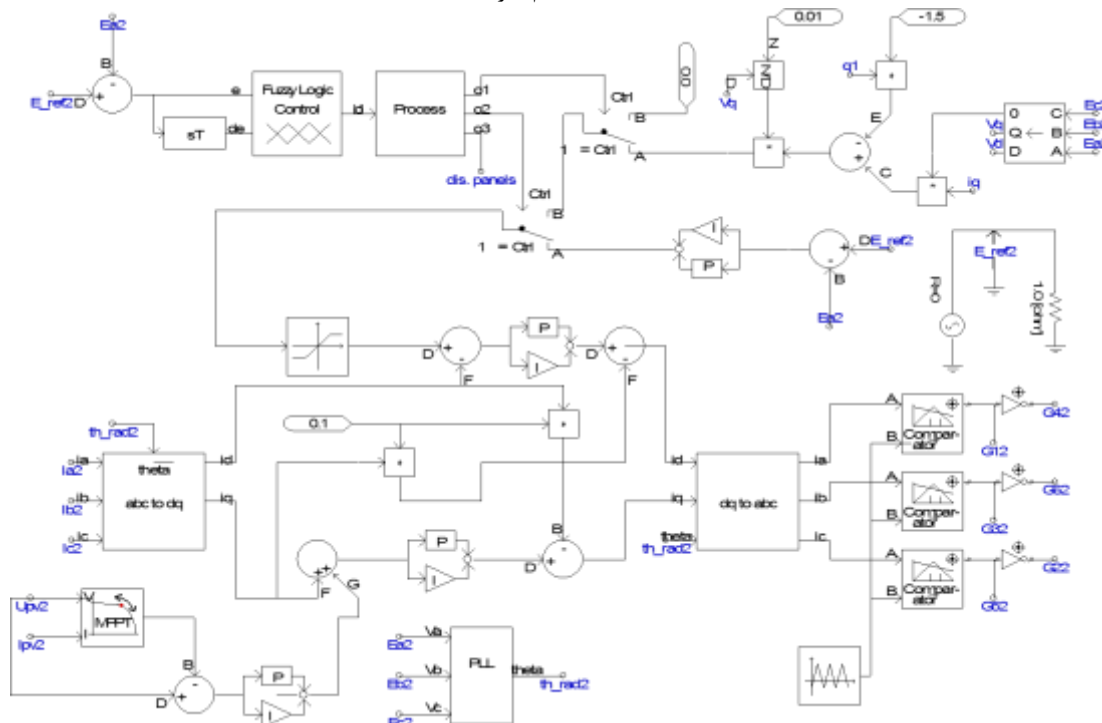
بین پنل‌های خورشیدی و اینورتر، از کل ظرفیت اینورتر برای جبران‌سازی توان راکتیو باس بار استفاده می‌کند و با تزریق توان راکتیو به میزان ۴/۵ کیلووار باعث بازیابی ولتاژ باس بار می‌گردد.

در حالت کلی و با توجه به شبیه‌سازی می‌توان به صورت زیر نتایج را بیان کرد:

الف- زمان کمتر از ۲ ثانیه: سیستم در همه حالت‌ها به طور معمول کار می‌کند، ولتاژ در باس بار ۱ پریونیت است. تولید توان راکتیو در این بازه زمانی صفر است.



(الف) سیستم قدرت



(ب) واحدهای کنترل جبران‌کننده استاتیکی فتوولتائیک به همراه کنترل پیشنهادی فازی

شکل (۸): مدل سیستم مورد مطالعه در نرم افزار PSCAD/EMTDC

Figure (8): Model of the study system in PSCAD/EMTDC, (a) Power system, (b) PV-STATCOM control units with proposed fuzzy control

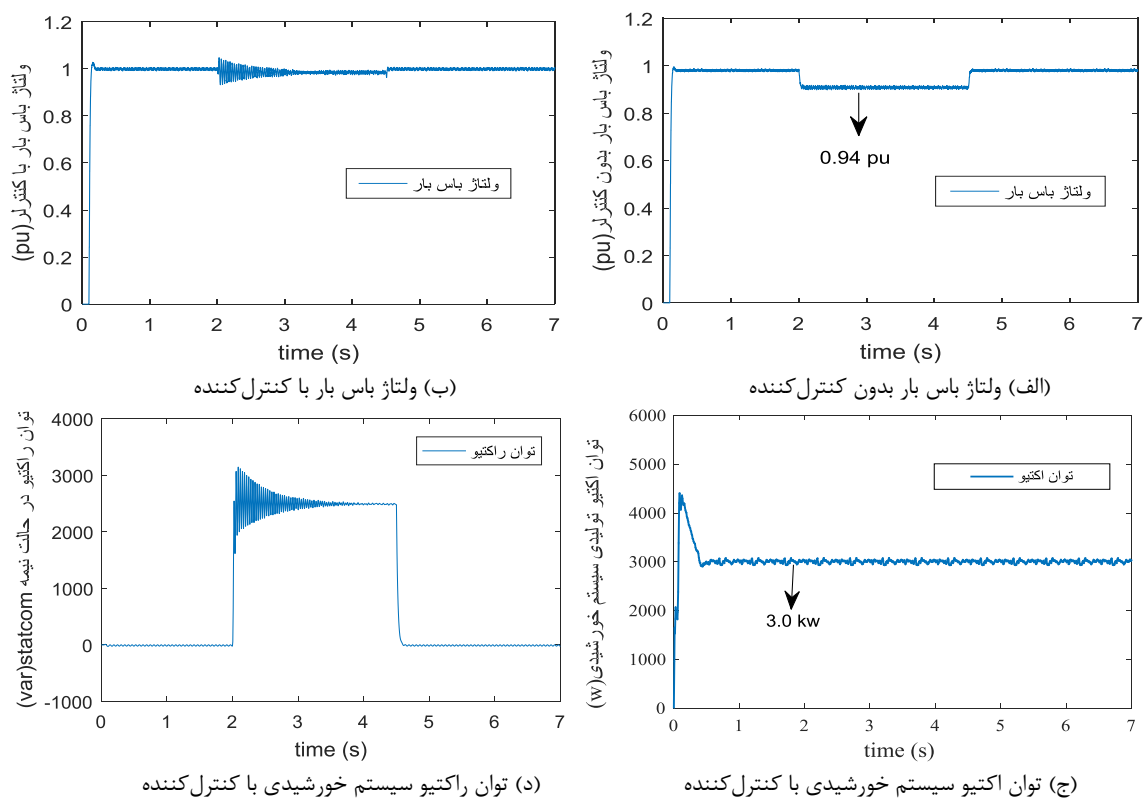
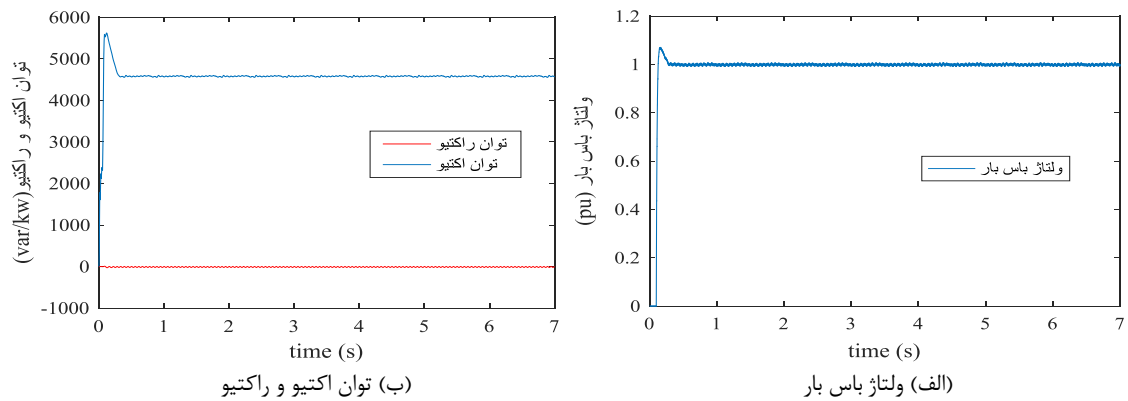


Table (1): The results of overshoot and sitting time

جدول (۱): نتایج اورشوت و زمان نشست

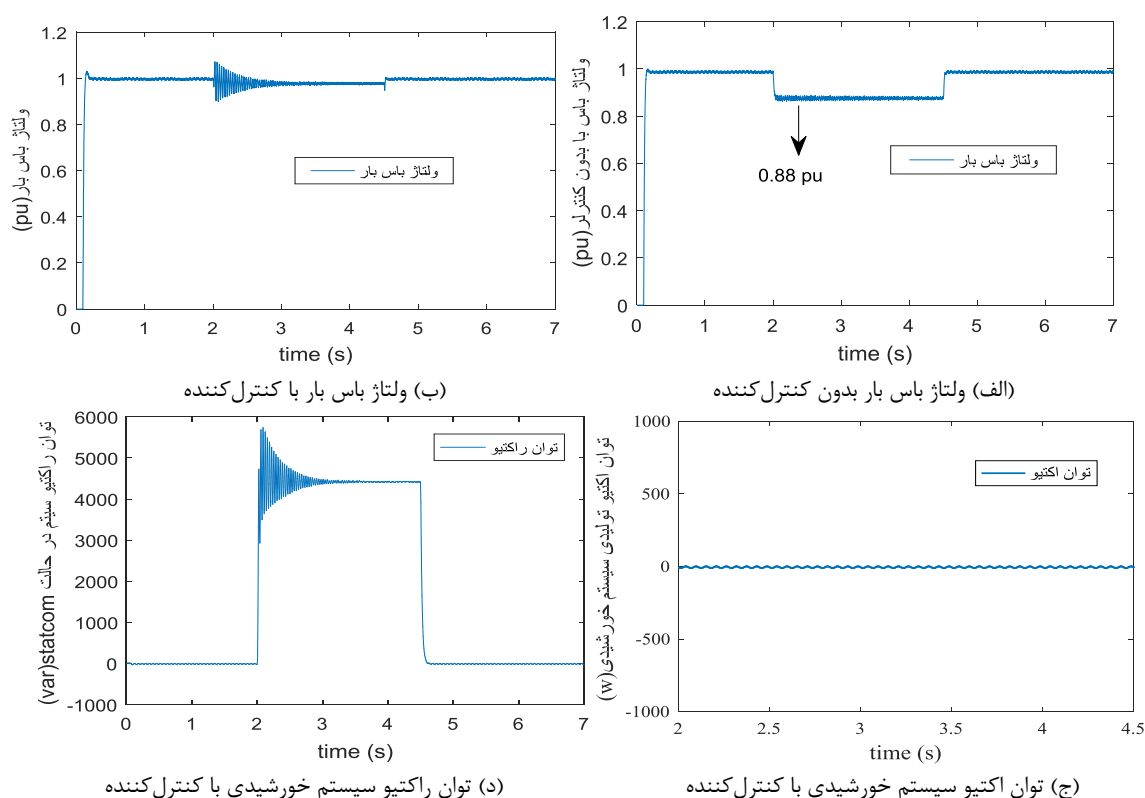
حالت	نوع سیستم	بار متغیر	زمان نشست (ثانیه)	اورشوت (درصد)
۱	سیستم در حالت PV	۰	۰	۰
۲	سیستم در حالت نیمه STATCOM	۵ کیلووار	۰/۵	۴
۳	سیستم در حالت STATCOM	۹ کیلووار	۱/۳	۱۰

ب- زمان بین ۲ الی ۴/۵ ثانیه: با اتصال بارهای ۵ کیلووار و ۹ کیلووار به باس بار در بازه زمانی ۴/۵-۲ ثانیه، در هر حالت متناسب با بارها، افت ولتاژ در باس بار ایجاد می شود و ولتاژها به ترتیب به ۰/۹۴ پریونیت و ۰/۸۸ پریونیت کاهش می یابند. کنترل کننده

افت ولتاژ باس بار را در هر حالت تشخیص داده و با توجه به توان راکتیو مورد نیاز آن را جبران می‌کند و سیستم خورشیدی (مطابق توضیحات فوق) را به حالت نیمه STATCOM و تغییر می‌دهد. با تزریق توان راکتیو به باس بار، ولتاژ به محدوده‌های قابل قبول باز می‌گردد.

ج- زمان بیشتر از ۴/۵ ثانیه: بار بزرگ قطع شده و نیازی به جبران‌سازی توان راکتیو نیست. مقدار ولتاژ سیستم به شرایط قبل از اختلال باز می‌گردد. مشاهده می‌شود که با افزایش بار و ایجاد افت ولتاژ و تشخیص آن توسط کنترل هوشمند، با تزریق توان راکتیو مورد نیاز ولتاژ با اورشوت و زمان نشست به مقدار قابل قبول و پایدار خود می‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که افت ولتاژ و توان راکتیو بیشتر تزریق شده به باس بار، اورشوت و زمان نشست بیشتری را به همراه دارد. نتایج اورشوت و زمان نشست در همه حالت‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

در ادامه جبران‌سازی توان راکتیو باس بار، با استفاده از کنترل هوشمند فازی و کنترل‌کننده متداول PV-STATCOM، از نظر میزان توان راکتیو تزریق شده و همچنین مقدار اورشوت^{۲۳} و زمان نشست^{۲۴} ولتاژ در بار یکسان ۵ کیلووار، با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، برای جبران‌سازی توان راکتیو باس بار توسط کنترل هوشمند پیشنهادی فازی در مقایسه با کنترل‌کننده‌های متداول، مشاهده می‌شود که در حالت کنترل فازی ولتاژ با اورشوت کمتری همراه است، همچنین با زمان نشست کوتاه‌تر به مقدار پایدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر مقدار اورشوت و زمان نشست تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. از نظر میزان توان راکتیو تزریق شده به باس بار نیز مشاهده می‌شود که در حالت کنترل فازی ظرفیت کمتری از اینورتر برای جبران‌سازی استفاده می‌شود. نتایج عددی در جدول (۲) آمده است.



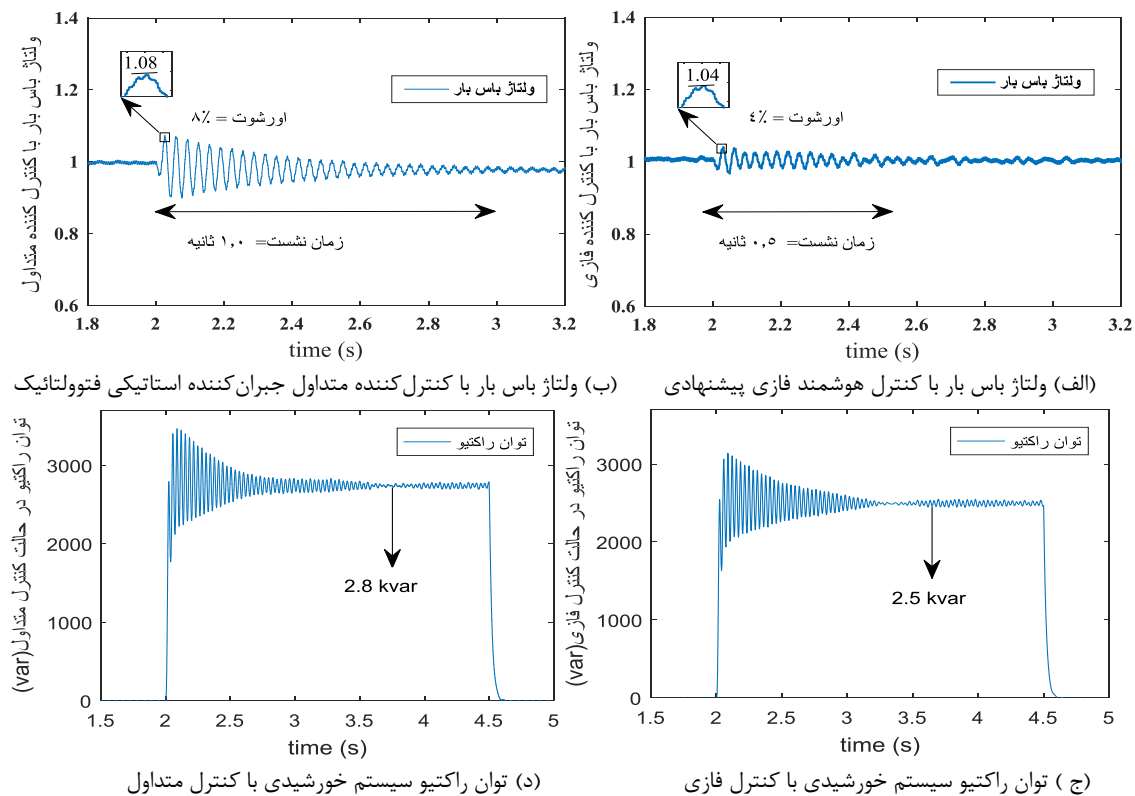
شکل (۱۱): پاسخ‌های سیستم در حالت STATCOM

Figure (11): System responses (a) Load bus voltage without control, (b) Bus voltage with controller, (c) Active power of solar system with controller, (d) Reactive power of solar system with controller

Table (2): Overshoot and settling time of voltage in load bus for PV-STATCOM system

جدول (۲): اورشوت و زمان نشست ولتاژ در باس بار برای سیستم جبران‌کننده استاتیکی فتوولتائیک

نوع کنترل‌کننده	اورشوت (درصد)	زمان نشست (ثانیه)
کنترل‌کننده متداول	۸	۱/۰
کنترل‌کننده فازی پیشنهادی	۴	۰/۵



شکل (۱۲): مقایسه پاسخ‌ها

Figure (12): Comparison of responses (a) Load bus voltage with proposed smart fuzzy control, (b) Load bus voltage with conventional PV-STATCOM controller, (c) Reactive power of solar system with fuzzy control, (d) Reactive power of solar system with conventional control

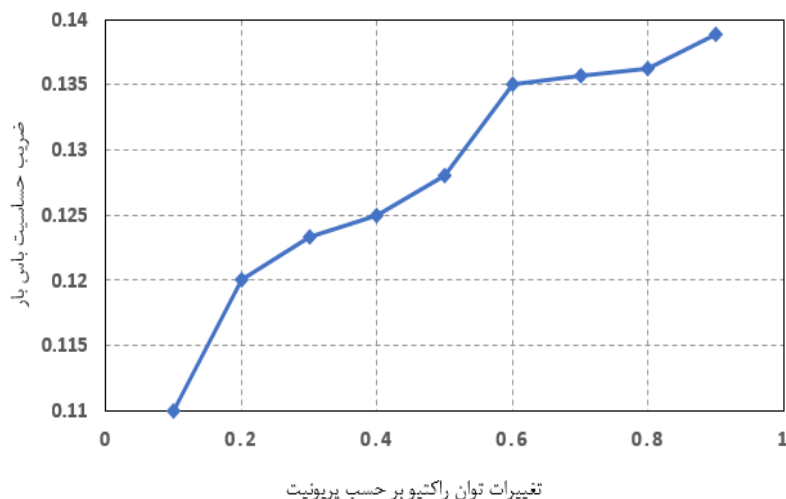
۲-۵- تحلیل حساسیت

مهمترین هدف از تحلیل حساسیت تعریف یک شاخص پایداری و چگونگی تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر این شاخص است. با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت می‌توان اطلاعات خوبی را در خصوص رابطه بین مدهای کنترلی و متغیرهای مورد بررسی در پایداری سیستم به دست آورد. در این مقاله از نسبت تغییرات ولتاژ به تغییرات توان راکتیو تزریق شده به باس بار برای محاسبه ضریب حساسیت استفاده شده است. داده‌های مربوط به تحلیل حساسیت در باس بار تحت شرایط مختلف بارگذاری، برای هر حالت کنترل، در جدول (۳) آمده و همچنین نمودار ضریب حساسیت در شکل (۱۳) رسم شده است. همان‌طور که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود، علاوه بر بار ثابت اهمی ۲۵ کیلووات، بار سلفی به صورت پله‌های ۱۰ درصدی به سیستم وارد می‌گردد.

Table (3): Sensitivity analysis in load bus

جدول (۳): تحلیل حساسیت در باس بار

حالت کارکرد	ضریب حساسیت ($\Delta V / \Delta Q$)	ΔV (pu)	ΔQ (pu)	ΔP (pu)	شرایط بار متغیر
نیمه STATCOM	۰/۱۱	۰/۰۱۱	۰/۱	۰/۹	بار سبک
	۰/۱۲	۰/۰۲۴	۰/۲	۰/۸	
	۰/۱۲۳۳	۰/۰۳۷	۰/۳	۰/۷	
	۰/۱۲۵	۰/۰۵	۰/۴	۰/۶	
	۰/۱۲۸	۰/۰۶۴	۰/۵	۰/۵	
STATCOM	۰/۱۳۵	۰/۰۸۱	۰/۶	۰	بار سنگین
	۰/۱۳۵۷۰	۰/۰۹۵	۰/۷	۰	
	۰/۱۳۶۲۵	۰/۱۰۹	۰/۸	۰	
	۰/۱۳۸۹	۰/۱۲۵	۰/۹	۰	



شکل (۱۳): نمودار ضریب حساسیت باس بار

Figure (13): Load bus sensitivity coefficient chart

فرض می‌شود که در هر پله با کاهشی به میزان ۱۰ درصد از ظرفیت تولید توان اکتیو سیستم خورشیدی، این ظرفیت به عنوان ظرفیت آزاد شده برای تولید توان راکتیو مورد استفاده قرار گیرد. در هر مرحله با تزریق توان راکتیو به باس بار تغییرات ولتاژ و به طبع آن ضریب حساسیت محاسبه می‌گردد. با در نظر گرفتن این که در طول روز تولید توان اکتیو سیستم به دلیل میزان تابش خورشید کمتر از پنجاه درصد نمی‌شود، در صورت اضافه شدن بیشتر بار، ظرفیت باقیمانده سیستم خورشیدی در حالت نیمه STATCOM قادر به تامین توان راکتیو بیشتر نیست، در این حالت با قطع ارتباط پنل‌های خورشیدی با اینورتر سه فاز توسط کنترل هوشمند پیشنهادی، تولید توان اکتیو سیستم به صفر می‌رسد و سیستم به حالت STATCOM تغییر می‌کند. با توجه به تعریف، سیستمی از نظر ولتاژ پایدار است که حساسیت $V-Q$ آن برای هر باس مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت برای باس منفی شود، پس با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای ضریب حساسیت، شرط پایداری برای سیستم مورد بررسی صدق می‌کند [۳۱].

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک کنترل هوشمند فازی برای سیستم PV-STATCOM با عملکرد ۲۴ ساعته برای بهبود پایداری ولتاژ سیستم قدرت پیشنهاد می‌کند. برای این منظور یک سیستم خورشیدی با قابلیت کنترل به‌صورت PV-STATCOM به باس بار متصل گردید. کنترل‌کننده فازی که یک کنترل‌کننده نرم است، به‌طور هوشمندانه عملکرد سیستم فتوولتائیک خورشیدی را در سه حالت PV، نیمه STATCOM و STATCOM انجام می‌دهد و با تزریق توان راکتیو باعث تنظیم ولتاژ در باسی که به آن متصل شده است، می‌گردد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده فازی پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده‌های متداول به لحاظ دینامیکی (اورشوت و زمان نشست) و استاتیکی (میزان تولید توان راکتیو) عملکرد بهتری را دارد. همچنین با تحلیل حساسیت صورت گرفته برای باس بار، پایداری سیستم قدرت در شرایط و حالت‌های مختلف کاری با تمرکز بر روی تولید بهینه توان اکتیو و راکتیو، به اثبات رسید. به‌کارگیری این ایده برای منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر به ما این امکان را می‌دهد تا کیفیت توان را با استفاده از زیرساخت‌های موجود، با هزینه کمتر و بدون استفاده از دستگاه‌های FACTS بهبود دهیم.

References

مراجع

- [1] M. Ocak, Z. Ocak, S. Bilgen, S. Keleş, K. Kaygusuz, "Energy utilization, environmental pollution and renewable energy sources in turkey", Energy Conversion and Management, vol. 45, no. 6, pp. 845–864, April 2004 (doi: 10.1016/S0196-8904 (03) 00192-4).
- [2] M.A.H. Rafi, T. Vo, P.H. Nguyen, "Effective integration of large-scale wind power using PV-STATCOM",

- The Journal of Engineering, vol. 2019, no. 18, pp. 5303–5307, July 2019 (doi: 10.1049/joe.2018.9232).
- [3] C. Magazzino, P. Toma, G. Fusco, D. Valente, I. Petrosillo, “Renewable energy consumption, environmental degradation and economic growth: the greener the richer”, *Ecological Indicators*, vol. 139, Article Number: 108912, June 2022 (doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108912).
- [4] R.K. Varma, M. Akbari, “Simultaneous fast frequency control and power oscillation damping by utilizing pv solar system as pv-statcom”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 415–425, Jan. 2020 (doi: 10.1109/TSTE.2019.2892943).
- [5] R.K. Varma, S. Mohan, “Mitigation of fault induced delayed voltage recovery (FIDVR) by PV-STATCOM”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 1666–1666, March 2022 (doi: 10.1109/TPWRS.2022.314-8029).
- [6] H. Karbouj, Z.H. Rather, B.C. Pal, “Adaptive voltage control for large scale solar PV power plant considering real life factors”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 990–998, April 2021 (doi: 10.1109/TSTE.2020.3029102).
- [7] R.K. Varma, E.M. Siavashi, “PV-STATCOM: A new smart inverter for voltage control in distribution systems”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1681–1691, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TSTE.20-18.2808601).
- [8] S. Dhanapal, R. Anita, “Voltage and frequency control of stand alone self-excited induction generator using photovoltaic system based STATCOM”, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 25, no. 4, pp. 1–24, Nov. 2015 (doi: 10.1142/S0218126616500316).
- [9] Y. Du, Y. Men, L. Ding, X. Lu, “Large-signal stability analysis for inverter-based dynamic microgrids reconfiguration”, *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 14, no. 2, pp. 836–852, March 2023 (doi: 10.1109/TSG.20-21.3123937).
- [10] J. Park, J. Yu, J. Kim, M. Kim, K. Kim, S. Han, “Frequency/voltage regulation with STATCOM with battery in high voltage transmission system”, *International Federation of Automatic Control*, vol. 49, no. 27, pp. 296–300, Nov. 2016 (doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.707).
- [11] M.Y. Suliman, “Voltage profile enhancement in distribution network using static synchronous compensator STATCOM”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 3367–3374, Aug. 2020 (doi: 10.11591/ijece.v10i4.pp3367-3374).
- [12] A.J. Ali, M.Y. Suliman, L.A. Khalaf, N.S. Sultan, “Performance investigation of stand-alone induction generator based on STATCOM for wind power application”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 5570–5578, Dec. 2020 (doi: 10.11591/ijece.v10i6.pp5570-5578).
- [13] W. Rohouma, R.S. Balog, M.M. Begovic, A.A. Peerzada, “Capacitor-less D-STATCOM for voltage profile improvement in a smartgrid distribution network with high pv penetration”, *Proceeding of the IEEE/ICSG*, vol. 3, pp. 155–159, Istanbul, Turkey, May 2022 (doi: 10.1109/icSmartGrid55722.2022.9848771).
- [14] C.A. Cañizares, M. Pozzi, S. Corsi, E. Uzunovic, “STATCOM modeling for voltage and angle stability studies”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 431–441, July 2003 (doi: 10.1016/S0142-0615 (02)00125-4).
- [15] A. Moeini, I. Kamwa, “analytical concepts for reactive power based primary frequency control in power systems”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 4217–4230, Nov. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2511153).
- [16] R.K. Varma, V. Khadkikar, R. Seethapathy, “Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 24, no. 4, pp. 983–985, Dec. 2009 (doi: 10.1109/TEC.2009.2031814).
- [17] R.K. Varma, S. Mohan, J. McMichael-Dennis, “Multimode control of PV-STATCOM for stabilization of remote critical induction motor”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 6, pp. 1872–1881, Nov. 2020 (doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3013975).
- [18] R.K. Varma, E.M. Siavashi, “Enhancement of solar farm connectivity with smart PV inverter PV-STATCOM”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1161–1171, July 2019 (doi: 10.1109/TSTE.2018.2862405).
- [19] R.K. Varma, H. Maleki, “PV solar system control as STATCOM (PV-STATCOM) for power oscillation damping”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1793–1803, Oct. 2019 (doi: 10.1109/TSTE.-2018.2871074).
- [20] R.K. Varma, R. Salehi, “SSR mitigation with a new control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM)”, *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1473–1483, Oct. 2017 (doi: 10.1109/TST-E.2017.2691279).
- [21] R.K. Varma, E.M. Siavashi, S. Mohan, T. Vanderheide, “First in canada, night and day field demonstration of a new photovoltaic solar-based flexible AC transmission system (FACTS) Device PV-STATCOM for stabilizing critical induction motor”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149479–149492, Aug. 2019 (doi: 10.1109/A-CCES.2019.2935161).

- [22] N. Goel, S. Chacko, R.N. Patel, "PI controller tuning based on stochastic optimization technique for performance enhancement of DTC induction motor drives", *Journal of the Institution of Engineers*, vol. 101, no. 6, pp. 699–706, Oct. 2020 (doi: 10.1007/s40031-020-00496-z).
- [23] M.I. Mosaad, H.S.M. Ramadan, M. Aljohani, M.F. El-Naggar, S.S.M. Ghoneim, "Near-optimal PI controllers of STATCOM for efficient hybrid renewable power system", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 34119-34130, Feb. 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058081).
- [24] S.R.K. Varma, S.A. Rahman, T. Vanderheide, "New control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM) for increasing grid power transmission limits during night and day", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 755–763, April 2015 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2375216).
- [25] R.K. Varma, S.A. Rahman, V. Atodaria, S. Mohan, T. Vanderheide, "Technique for fast detection of short circuit current in pv distributed generator", *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 155-165, Dec. 2016 (doi: 10.1109/JPETS.2016.2592465).
- [26] R. Kumar, R. Diwania, S. Khetrapal, "Performance assessment of the two metaheuristic techniques and their Hybrid for power system stability enhancement with PV-STATCOM", *Neural Computing and Applications*, vol. 34, pp. 3723–3744, March 2022 (doi: 10.1007/s00521-021-06637-9).
- [27] A. Teke, M. E. Meral, L. Saribulut, M. Tümay, "Implementation of fuzzy logic controller using FORTRAN language in PSCAD/EMTDC", *International Journal of Electrical Engineering and Education*, vol. 48, no. 4, pp. 372–390, Oct. 2012 (doi: 10.7227/IJEE.48.4.3).
- [28] A. Solat, A.M. Ranjbar, B. Mozafari, "A comparative study on fuzzy damping controller for DFIG wind farms to improve power system oscillations", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 4965–4978, Jan. 2019 (doi: 10.3233/JIFS-181524).
- [29] S. Souri, H. Mohammadnezhad-Shourkaei, S. Soleymani, B. Mozafari, "Reactive power management in low voltage distribution networks using capability and oversizing of PV smart inverters", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 56, pp. 21-42, March 2024 (in Persian) (dor: 20.1001.1.2-3223871.1402.14.56.2.2).
- [30] M. Abbasi, M. Nafar, M. Simab, "Management and control of microgrids connected to three-phase network with the approach of activating current limitation under unbalanced errors using fuzzy intelligent method with the presence of battery, wind, photovoltaic and diesel sources", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 49, pp. 55-66, June 2022 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.49.4.3).
- [31] F. Haghighatdar-Fesharaki, A. Haghshenas, "STATCOM controller design with using of improved robust backstepping algorithm based on PSO to reduce large signal disturbances in power systems", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 37, pp. 3-12, May 2019 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1398.10.37.1.5).
- [32] C.Y. Tang, J.H. Jheng, "An active power ripple mitigation strategy for three-phase grid-tied inverters under unbalanced grid voltages", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 27-33, Jan. 2023 (doi: 10.1109/TPEL.2022.3198410).

زیرنویس‌ها

1. Renewable energy
2. Photovoltaic
3. Photovoltaic farms
4. Voltage instability
5. Heavy loading
6. Flexible ac transmission system
7. Static synchronous compensator
8. Shunt compensation
9. Reactive power compensation
10. Photovoltaic based on static synchronous compensator
11. Power system stabilizer
12. Temporary over voltages
13. Power oscillation damping
14. Sub synchronous resonance
15. Dynamic load disturbances
16. Voltage source inverter
17. Current controller
18. Reference signal
19. Maximum power point tracking
20. Membership function

- 21. Fuzzy inference system
- 22. Remaining capacity of the inverter
- 23. Overshoot
- 24. Settling time