Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 15 - No. 2 – Summer 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Dynamic Analysis of Power Systems Equipped with Static Synchronous Compensators: A Review of Operation and Stability Indicators

Abozar Asadi[1,2], *Ms.C.*, Ghazanfar Shahgholian[*1,2], *Professor*, Mahnaz Hashemi[1,3], *Associate Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, abooozarasadi@gmail.com
[2] Smart Microgrid Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholian@iau.ac.ir
[3] Digital Processing and Machine Vision Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, mahnazhashemi100@iau.ac.ir

Abstract:

In the face of the transition of power grids towards renewable energy sources-based structures and the increase in the density of nonlinear loads, maintaining dynamic stability and voltage profile has become one of the main operational challenges. Static synchronous compensators (STATCOMs), as one of the most efficient devices in flexible alternating current transmission systems (FACTSs), play a key role in voltage support and transient response improvement. However, despite their widespread use, the quantitative and systematic evaluation of the dynamic performance of these devices in modern complex networks remains a challenge. Most of the existing studies have focused on the design of control strategies, and the lack of a reference framework for defining and analyzing tangible operational indicators makes it difficult to compare the effectiveness and evaluate the actual performance of STATCOMs. Aiming to fill this gap, the present paper provides a comprehensive review of the dynamic analysis of STATCOM-equipped power systems with a special emphasis on operational indicators. This study classifies and analyzes the evaluation indicators into four main categories: (1) voltage stability indicators (including recovery time, voltage dip depth, and stability margin), (2) reactive power performance indicators (response rate, converter saturation, and capacity utilization), (3) electromechanical oscillation damping indicators, and (4) power quality and harmonics indicators. This paper analyzes the relationship between control structures (such as conventional PI controls, advanced adaptive controls, and virtual synchronous generator (VSG)-based controls) and utilization indicators, and analyzes how network variables affect the transient response of the equipment. The findings of this study provide a quantitative and practical basis for operation experts and power system designers to evaluate the performance of STATCOMs under different network conditions and optimize their control strategies to increase system reliability and stability using the proposed criteria.

Keywords: dynamic analysis, flexible alternating current transmission systems, operating indicators, static synchronous compensator, transient response, voltage stability

Received: 21 Jun. 2026
Revised: 11 July 2026
Accepted: 27 July 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Ghazanfar Shahgholian

Citation: A. Asadi, G. Shahgholian, M. Hashemi, "Dynamic Analysis of Power Systems Equipped with Static Synchronous Compensators: A Review of Operation and Stability Indicators", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 25-62, August 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

مقاله مروری

تحلیل دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی: مروری بر شاخص‌های بهره‌برداری و پایداری

ابوذر اسدی[۱،۲]، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، غضنفر شاهقلیان[۱،۲]، استاد، مهناز هاشمی[۱،۳]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، abooozarasadi@gmail.com
۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shahgholian@iau.ac.ir
۳- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، mahnazhashemi100@iau.ac.ir

چکیده: در مواجهه با گذار شبکه‌های قدرت به سمت ساختارهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر و افزایش چگالی بارهای غیرخطی، حفظ پایداری دینامیکی و پروفیل ولتاژ به یکی از چالش‌های اصلی بهره‌برداری تبدیل شده است. جبران‌سازهای سنکرون استاتیکی (STATCOM) به عنوان یکی از کارآمدترین ادوات سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS)، نقش کلیدی در پشتیبانی ولتاژ و بهبود پاسخ‌های گذرا ایفا می‌کنند. با این حال، علی‌رغم کاربرد گسترده، ارزیابی کمی و نظام‌مند عملکرد دینامیکی این تجهیزات در شبکه‌های پیچیده مدرن، همچنان با چالش مواجه است. اغلب مطالعات موجود بر طراحی استراتژی‌های کنترلی متمرکز بوده و فقدان یک چارچوب مرجع جهت تعریف و تحلیل شاخص‌های بهره‌برداری ملموس، مقایسه اثربخشی و ارزیابی عملکرد واقعی STATCOM را دشوار می‌سازد. مقاله حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به مروری جامع بر تحلیل دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به STATCOM با تأکید ویژه بر شاخص‌های بهره‌برداری می‌پردازد. این مطالعه، شاخص‌های ارزیابی را در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی و تحلیل می‌کند: (۱) شاخص‌های پایداری ولتاژ (از جمله زمان بازیابی، عمق افت ولتاژ و حاشیه پایداری)، (۲) شاخص‌های عملکرد توان راکتیو (نرخ پاسخ، اشباع مبدل و بهره‌برداری از ظرفیت)، (۳) شاخص‌های میرایی نوسانات الکترومکانیکی و (۴) شاخص‌های کیفیت توان و هارمونیک‌ها. این مقاله ضمن واکاوی ارتباط میان ساختارهای کنترلی (مانند کنترل‌های مرسوم PI، کنترل‌های پیشرفته تطبیقی و مبتنی بر ژنراتور سنکرون مجازی (VSG) و شاخص‌های بهره‌برداری، چگونگی تأثیر متغیرهای شبکه بر پاسخ گذرای تجهیز را تحلیل می‌کند. یافته‌های این پژوهش، مبنایی کمی و کاربردی برای متخصصان بهره‌برداری و طراحان سیستم‌های قدرت فراهم می‌آورد تا بتوانند با استفاده از معیارهای پیشنهادی، عملکرد STATCOM را در شرایط مختلف شبکه ارزیابی کرده و استراتژی‌های کنترلی خود را در جهت افزایش قابلیت اطمینان و پایداری سیستم بهینه‌سازی نمایند.

کلمات کلیدی: پاسخ گذرا، پایداری ولتاژ، تحلیل دینامیکی، جبران‌ساز سنکرون استاتیکی، سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر، شاخص‌های بهره‌برداری

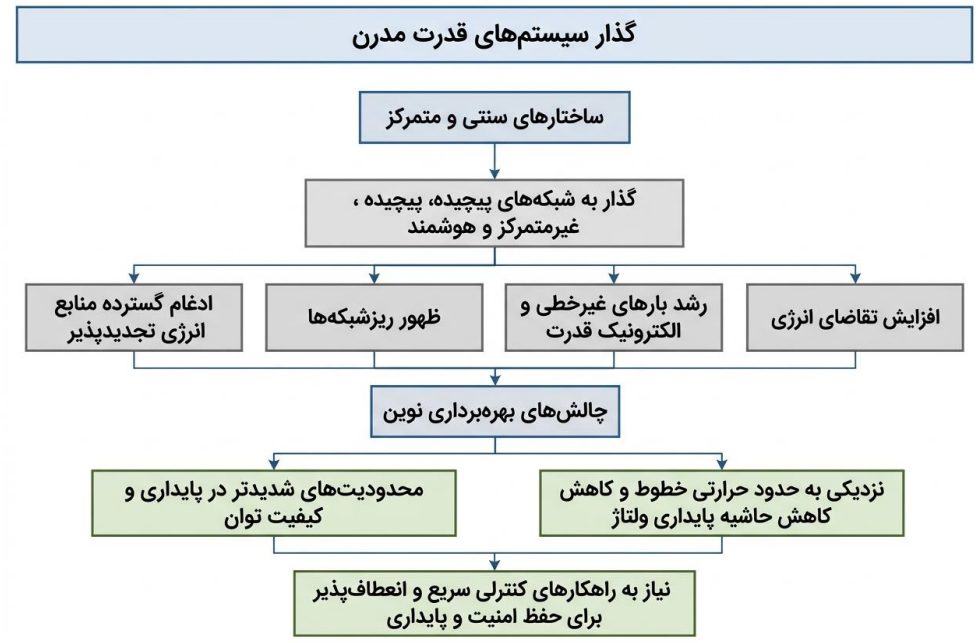
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۳۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر غضنفر شاهقلیان
نشانی نویسنده مسئول: نجف‌آباد، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت مدرن در حال تجربه یک تحول پارادایمیک و گذاری بنیادین در ساختار، استراتژی‌های بهره‌برداری و مدیریت انرژی هستند. این دگرگونی که عمدتاً تحت تأثیر سیاست‌های کربن‌زدایی و حرکت به سوی شبکه‌های هوشمند[۱] قرار دارد، ترکیب تولیدات نیروگاهی را به‌طور محسوس تغییر داده است [۱،۲]. افزایش چشمگیر نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل[۲] (CBRs)، نظیر نیروگاه‌های فتوولتائیک و مزارع بادی، در کنار گسترش زیرساخت‌های الکترونیک قدرت در سطوح مختلف شبکه، منجر به ظهور شبکه‌های با اینرسی پایین شده است [۳،۴]. جایگزینی ژنراتورهای سنکرونِ دارای اینرسی مکانیکی بالا با مبدل‌های سریع و مبتنی بر الگوریتم‌های کنترلی، نه تنها دینامیک‌های سیستم را به شدت پیچیده کرده، بلکه حساسیت شبکه را در برابر اغتشاشاتِ کوتاه‌مدت افزایش داده است [۵،۶]. شکل (۱) روند تحول در سیستم‌های قدرت را نشان می‌دهد که ناشی از ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، ظهور ریزشبکه‌ها و گسترش الکترونیک قدرت است. این گذار باعث افزایش پیچیدگی شبکه شده و محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌ای را در زمینه پایداری و کیفیت توان ایجاد می‌کند. با نزدیک شدن سیستم به حدود حرارتی خطوط و کاهش حاشیه پایداری ولتاژ، نیاز مبرمی به به‌کارگیری راهکارهای کنترلی سریع و انعطاف‌پذیر جهت حفظ امنیت و پایداری شبکه احساس می‌شود.



شکل (۱): چارچوب مفهومی گذار از سیستم‌های قدرت سنتی و متمرکز به شبکه‌های هوشمند و غیرمتمرکز مدرن و چالش‌های عملیاتی ناشی از آن.

Figure 1. Conceptual framework of the transition from traditional centralized power systems to modern intelligent decentralized networks and the resulting operational challenges.

در سوی دیگر، افزایش نفوذ بارهای غیرخطی، درایوهای فرکانس متغیر[۳] (VFDs) و بارهای حساسِ توان‌الکترونیکی، ماهیت بارهای شبکه را از حالتِ صرفاً امپدانسی و قابل پیش‌بینی به سمت بارهای پویا و با رفتار فرکانسیِ پیچیده تغییر داده است. هم‌افزاییِ این تغییرات در سمت تولید و مصرف، موجب تضعیف توانایی شبکه در حفظ تعادل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو شده است. در چنین محیط عملیاتیِ متراکمی، حفظ پایداری ولتاژ به یکی از چالش‌برانگیزترین مباحث در مطالعات پایداری سیستم‌های قدرت تبدیل شده است؛ چرا که برخلاف سیستم‌های کلاسیک، حاشیه امنیتِ دینامیکی در شبکه‌های مدرن بسیار باریک‌تر شده است. کوچک‌ترین اغتشاش در تعادل توان، یا بروز یک حادثه گذرای گذرا، می‌تواند به سرعت فرآیند افت ولتاژ زنجیره‌ای را آغاز کند، میرایی نوسانات ولتاژ را مختل سازد و در نهایت، با عبور از نقاط بحرانی پایداری، منجر به ناپایداری ولتاژ یا فروپاشی موضعی یا سراسری سیستم قدرت گردد [۷،۸].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

در این میان، استفاده از ادوات سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر[۴] (FACTS) به عنوان راهکاری عملیاتی برای مدیریت بهینه سیستم‌های قدرت مطرح شده است [۹،۱۰]. در بین این ادوات، جبران‌ساز سنکرون استاتیکی[۵] (STATCOM) به دلیل بهره‌گیری از فناوری مبدل‌های منبع ولتاژ[۶] (VSC)، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات دینامیکی و عملیات شبکه یافته است. برخلاف جبران‌سازهای کلاسیک نظیر SVC، ماهیت سریع، کنترل‌پذیری بالا و توانایی تزریق توان راکتیو مستقل از سطح ولتاژ باس (حتی در شرایط افت ولتاژ شدید)، STATCOM را به ابزاری قدرتمند برای بهبود پایداری گذرای سیستم، میرایی نوسانات الکترومکانیکی و بازیابی ولتاژ تبدیل کرده است [۱۱،۱۲].

با این وجود، آنچه در بهره‌برداری واقعی از این تجهیزات اهمیت دارد، تنها قابلیت‌های تئوریک دستگاه نیست، بلکه چگونگی ارزیابی عملکرد آن در محیط دینامیکی شبکه است. تحلیل‌های سنتی که اغلب بر معیارهای پایداری در حالت ماندگار تکیه دارند، دیگر برای شبکه مدرن ناکافی به نظر می‌رسند. امروزه، اپراتورها و مهندسان بهره‌برداری نیازمند چارچوبی دقیق برای ارزیابی عملکرد دینامیکی STATCOM هستند. این ارزیابی باید از دیدگاه‌های مختلفی نظیر زمان پاسخ، میزان بازیابی ولتاژ، حاشیه پایداری، کیفیت توان و هماهنگی با سایر تجهیزات حفاظتی صورت گیرد.

چالش اساسی در این حوزه، فقدان یک طبقه‌بندی جامع و توافق‌یافته از شاخص‌های بهره‌برداری[۷] برای سنجش عملکرد STATCOM در شرایط دینامیکی است. در بسیاری از مقالات فنی، تمرکز اصلی بر طراحی ساختارهای کنترلی جدید است، در حالی که معیارهای سنجش موفقیت این کنترل‌کننده‌ها در محیط‌های عملیاتی کمتر مورد واکاوی قرار گرفته است. آیا زمان بازیابی ولتاژ[۸]، به تنهایی شاخصی کافی برای ارزیابی عملکرد یک STATCOM است؟ یا باید شاخص‌هایی نظیر نرخ تغییرات توان راکتیو، حاشیه اشباع مبدل و تأثیر آن بر میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای نیز در محاسبات بهره‌برداری لحاظ شوند؟

مقاله حاضر با هدف پاسخ به این خلأ دانشی، به بررسی و مروری تحلیلی بر شاخص‌های بهره‌برداری در سیستم‌های قدرت مجهز به STATCOM می‌پردازد. این پژوهش ضمن تبیین مبانی دینامیکی عملکرد STATCOM، به طبقه‌بندی و تشریح شاخص‌های کلیدی می‌پردازد که در تحلیل‌های پس از حادثه و ارزیابی‌های زمان‌حقیقی کاربرد دارند. هدف نهایی این مقاله، فراهم آوردن مبنایی علمی و مهندسی برای محققان و متخصصان بهره‌برداری است تا بتوانند با استفاده از این شاخص‌های کمی، عملکرد جبران‌سازهای استاتیکی را در شبکه ارزیابی کرده و در نهایت، به سمت استراتژی‌های کنترلی بهینه‌تر گام بردارند. از برجستگی‌های اصلی مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- عملکرد جبران‌ساز سنکرون استاتیکی را در چهار حوزه به‌هم‌پیوسته شامل پایداری ولتاژ، پاسخ گذرا، کیفیت توان و شاخص‌های بهره‌برداری/اقتصادی به‌صورت نظام‌مند تحلیل کرده است.
- برخلاف بسیاری از مرورهای صرفاً فنی، با معرفی پنج شاخص کمیِ بهره‌برداری (ضریب بهره‌برداری، کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال، کاهش خاموشی و تحلیل هزینه–فایده) ارزش عملیاتی و توجیه‌پذیری اقتصادی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی نیز در کانون توجه قرار داده است.
- ارائه جدول‌های مقایسه‌ای برای مقایسه‌ی کیفی و کمّی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در برابر جبران‌ساز وار استاتیکی و بانک‌های خازنی از حیث سرعت پاسخ، محدوده عملکرد و شاخص‌های بهره‌برداری، به استنتاج‌های مطالعه استحکام تحلیلی بخشیده است.
- همراه‌سازی مباحث با شکل‌های مهندسی شامل منحنی ولتاژ برحسب توان راکتیو، پاسخ زمانی ولتاژ، دیاگرام کیفیت توان و شماتیک شاخص‌های اقتصادی، انتقال مفاهیم پیچیده دینامیکی را تسهیل کرده و انسجام بصری را ارتقا داده است.

ساختار و سازمان‌دهی مطالب به این صورت تدوین شده است که در بخش دوم، مبانی عملکرد جبران‌ساز سنکرون استاتیکی و اصول کنترل آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس در بخش سوم، تحلیل دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به این تجهیز شامل پاسخ گذرا، پایداری ولتاژ و هماهنگی کنترلی تحلیل می‌شود. در بخش چهارم، شاخص‌های بهره‌برداری در ارزیابی عملکرد STATCOM در قالب دسته‌های ولتاژی، توان راکتیو، پایداری دینامیکی، کیفیت توان و شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی معرفی و دسته‌بندی می‌شوند. بخش پنجم به بررسی ساختارهای کنترلی مختلف و اثر آن‌ها بر شاخص‌های مذکور از جمله کنترل‌های مرسوم PI، کنترل برداری، کنترل‌های تطبیقی و مقاوم و روش‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

اختصاص دارد و در نهایت، مقاله با بخش‌های روش‌های ارزیابی و شبیه‌سازی، جمع‌بندی تحلیلی و نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

۲- مبانی عملکرد جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی یکی از پیشرفته‌ترین ادوات سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر از نوع موازی است که بر پایه فناوری مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC) با کلیدهای نیمه‌هادی قدرت کاملاً کنترل‌پذیر طراحی و پیاده‌سازی می‌شود. اساس کارکرد این تجهیز شباهت مفهومی زیادی به عملکرد یک کندانسور سنکرون ایده‌آل بدون اینرسی مکانیکی دارد، با این تفاوت که به دلیل ساختار تمام‌الکترونیکی، قابلیت تغییر وضعیت و پاسخ دینامیکی آن در کسری از ثانیه و بدون محدودیت‌های اصطکاک، سایش مکانیکی یا پاسخ کند سیم‌پیچ‌های تحریک انجام می‌پذیرد [۱۳،۱۴].

عملکرد STATCOM بر پایه تولید یک شکل‌موج ولتاژ متناوب متقارن در پایانه خروجی مبدل و کنترل دقیق نسبت دامنه و زاویه فاز آن نسبت به ولتاژ باس شبکه استوار است. تبادل توان میان مبدل و شبکه از طریق یک امپدانس واسط، شامل راکتانس ترانسفورماتور اتصال یا راکتور کوپلینگ، انجام می‌شود و جهت و مقدار جریان راکتیو مبادله‌شده نیز مستقیماً به اختلاف دامنه بین ولتاژ تولیدی مبدل و ولتاژ نقطه اتصال بستگی دارد. به‌این‌ترتیب، هرگاه ولتاژ شبکه در اثر افزایش بار یا وقوع اغتشاش کاهش یابد، سیستم کنترل با افزایش دامنه ولتاژ خروجی مبدل نسبت به ولتاژ باس، جریانی پیش‌فاز نسبت به ولتاژ شبکه برقرار می‌کند؛ در این وضعیت، STATCOM همانند یک منبع خازنی دینامیکی سریع عمل کرده و با تزریق توان راکتیو، سبب تثبیت و بازیابی ولتاژ باس می‌شود [۱۵،۱۶]. در مقابل، در شرایط کم‌باری شبکه، بی‌باری خطوط طولانی انتقال و بروز پدیده فرانتی، یا هنگام وقوع جهش‌های ولتاژ، دامنه ولتاژ تولیدی مبدل به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که کمتر از ولتاژ باس باشد؛ در نتیجه، جریان عبوری پس‌فاز شده و STATCOM با جذب توان راکتیو اضافی، از ایجاد اضافه‌ولتاژهای مخرب در سیستم جلوگیری می‌کند. همچنین، زمانی که ولتاژ شبکه در محدوده نامی و پایدار قرار داشته باشد، دامنه ولتاژ مبدل دقیقاً برابر با ولتاژ باس تنظیم می‌شود و در این حالت، هیچ تبادل توان راکتیوی میان مبدل و شبکه صورت نمی‌گیرد و تجهیز در وضعیت شناور یا آماده‌به‌کار قرار دارد. افزون بر کنترل دامنه ولتاژ برای مدیریت توان راکتیو، کنترل زاویه فاز ولتاژ خروجی مبدل نسبت به زاویه ولتاژ شبکه نیز اهمیت اساسی دارد؛ زیرا با ایجاد اختلاف زاویه‌ای بسیار کوچک میان این دو ولتاژ، مقدار اندکی توان اکتیو میان شبکه و STATCOM مبادله می‌شود تا تلفات داخلی ناشی از کلیدزنی، مقاومت المان‌های سلفی و همچنین تلفات خازن لینک DC جبران شده و ولتاژ خازن لینک DC در مقدار تنظیمی خود ثابت باقی بماند [۱۷،۱۸].

شکل (۲) ساختار عملکردی یک STATCOM را در اتصال به شبکه نشان می‌دهد. مبدل منبع ولتاژ با استفاده از خازن لینک DC، ولتاژی متناوب تولید می‌کند که از طریق امپدانس کوپلینگ به باس شبکه متصل است. با کنترل دامنه ولتاژ خروجی مبدل نسبت به ولتاژ باس، STATCOM می‌تواند در شرایط افت ولتاژ، توان راکتیو تزریق کرده و ولتاژ را بازیابی کند، و در شرایط اضافه‌ولتاژ، توان راکتیو اضافی را جذب نماید. همچنین با اعمال اختلاف فاز کوچک بین ولتاژ مبدل و ولتاژ شبکه، مقدار کمی توان اکتیو برای جبران تلفات داخلی و ثابت نگه‌داشتن ولتاژ لینک DC مبادله می‌شود.

اگر ولتاژ خروجی مبدل V_{conv} از طریق راکتانس کوپلینگ X_C به ولتاژ باس V_{bus} متصل باشد، جریان عبوری از امپدانس واسط از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$I = \frac{V_{conv}\angle\delta - V_{bus}\angle 0}{jX_C} \qquad (۱)$$

که در آن V_{conv} دامنه ولتاژ تولیدی مبدل، V_{bus} دامنه ولتاژ باس شبکه، X_C راکتانس معادل ترانسفورماتور اتصال یا راکتور کوپلینگ، δ اختلاف زاویه فاز بین ولتاژ مبدل و ولتاژ شبکه هستند. این رابطه، مبنای تبادل توان اکتیو و راکتیو بین STATCOM و شبکه است. اگر زاویه δ بسیار کوچک باشد، با فرض صرف‌نظر از مقاومت و در نظر گرفتن مدل فازوری ساده، توان اکتیو و راکتیو تبادل‌شده بین مبدل و شبکه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

$$\begin{cases} P \approx \dfrac{V_{bus} V_{conv}}{X_C} \delta \\ Q \approx \dfrac{V_{bus}}{X_C}(V_{conv} - V_{bus}) \end{cases} \quad (۲)$$

بنابراین توان راکتیو عمدتاً با اختلاف دامنه ولتاژ کنترل می‌شود و توان اکتیو عمدتاً تابع اختلاف زاویه فاز است.

برای تحلیل دینامیکی و طراحی کنترل، مدل STATCOM معمولاً در دستگاه مرجع سنکرون dq بیان می‌شود. اگر R مقاومت معادل و L اندوکتانس معادل شاخه کوپلینگ باشد، و محور d با بردار ولتاژ شبکه هم‌راستا انتخاب شود، معادلات ولتاژ به‌صورت زیر هستند [۱۹،۲۰]:

$$\begin{cases} L\dfrac{di_d}{dt} = -R\, i_d + \omega L\, i_q + v_{conv,d} - V_{bus} \\ L\dfrac{di_q}{dt} = -R\, i_q - \omega L\, i_d + v_{conv,q} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن i_d و i_q مؤلفه‌های جریان در محورهای d و q و $v_{conv,d}$ و $v_{conv,q}$ مؤلفه‌های ولتاژ خروجی مبدل، $v_{bus,d}=V_{bus}$ و $v_{bus,q}=0$ مؤلفه‌های ولتاژ باس شبکه و ω سرعت زاویه‌ای سنکرون شبکه هستند. با انتخاب محور d هم‌راستا با ولتاژ شبکه، توان اکتیو و راکتیو سه‌فاز در دستگاه dq از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۲۱،۲۲]:

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2} V_{bus} i_d \\ Q = -\dfrac{3}{2} V_{bus} i_q \end{cases} \quad (۴)$$

بنابراین مؤلفه i_d کنترل‌کننده توان اکتیو و در نتیجه ولتاژ لینک DC است و مؤلفه i_q کنترل‌کننده توان راکتیو و در نتیجه ولتاژ باس شبکه است. خازن لینک DC نقش ذخیره‌ساز انرژی کوتاه‌مدت را دارد. دینامیک ولتاژ لینک DC را می‌توان با رابطه انرژی خازن بیان کرد [۲۳،۲۴]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2\right) = P_{dc} - P_{ac} - P_{loss} \quad (۵)$$

که در آن C_{dc} ظرفیت خازن لینک DC، V_{dc} ولتاژ لینک DC، P_{dc} توان ورودی سمت DC، در حالت STATCOM معمولاً صفر یا بسیار محدود، P_{ac} توان تبادلی سمت AC و P_{loss} تلفات مبدل و فیلترها هستند. در STATCOM بدون منبع انرژی خارجی، توان اکتیو فقط برای جبران تلفات مصرف می‌شود و کنترل‌کننده باید ولتاژ لینک DC را در مقدار مرجع نگه دارد.

بنابراین مدل STATCOM بر دو سازوکار اصلی استوار است: (الف) با تغییر دامنه ولتاژ مبدل نسبت به ولتاژ شبکه، توان راکتیو کنترل می‌شود و (ب) با تغییر زاویه فاز ولتاژ مبدل نسبت به شبکه، توان اکتیو کوچکی برای جبران تلفات و تثبیت ولتاژ لینک DC مبادله می‌شود.

کنترل STATCOM در چارچوب dq معمولاً بر پایه ساختار دوحلقه‌ای مطابق شکل (۳) طراحی می‌شود. در این ساختار، یک حلقه خارجی ولتاژ لینک DC، مرجع جریان محور d را برای جبران تلفات و تثبیت ولتاژ خازن DC تولید می‌کند، در حالی‌که حلقه خارجی ولتاژ باس یا توان راکتیو، مرجع جریان محور q را جهت کنترل توان راکتیو و تنظیم ولتاژ شبکه تعیین می‌نماید. سپس حلقه‌های داخلی جریان با استفاده از کنترل‌کننده‌های PI و جبران‌کننده‌های دیکاپلینگ، ولتاژ مرجع مبدل را تولید کرده و از طریق PWM یا SVPWM پالس‌های کلیدزنی لازم برای VSC را فراهم می‌کنند. هم‌زمان، یک PLL نیز زاویه مرجع سنکرون را برای تبدیل مختصات و هم‌فازسازی با ولتاژ شبکه تأمین می‌نماید.

۳- تحلیل دینامیکی در سیستم‌های قدرت مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

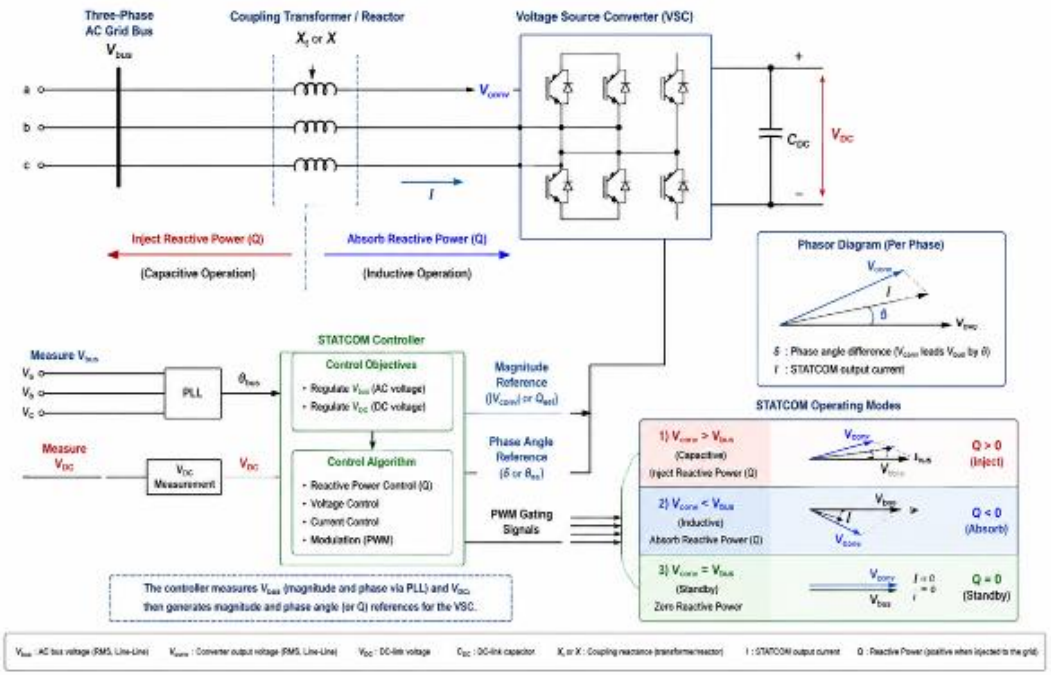
تحلیل دینامیکی به بررسی رفتار سیستم در برابر تغییرات زمانی، اختلالات و شرایط گذرا می‌پردازد. در شبکه‌های مجهز به STATCOM، این تحلیل معمولاً در چند سطح انجام می‌شود: (۱) مدل‌سازی حالت‌گذرای مبدل منبع ولتاژ و حلقه‌های کنترل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

ولتاژ جریان متناوب و جریان مستقیم، (۲) تحلیل پایداری سیگنال کوچک و کیفیت میرایی مودها، (۳) شبیه‌سازی اغتشاشات بزرگ برای سنجش پایداری گذرا و بازیابی ولتاژ و (۴) ارزیابی اثر جبران‌ساز بر شاخص‌های کیفیت توان و بهره‌برداری.

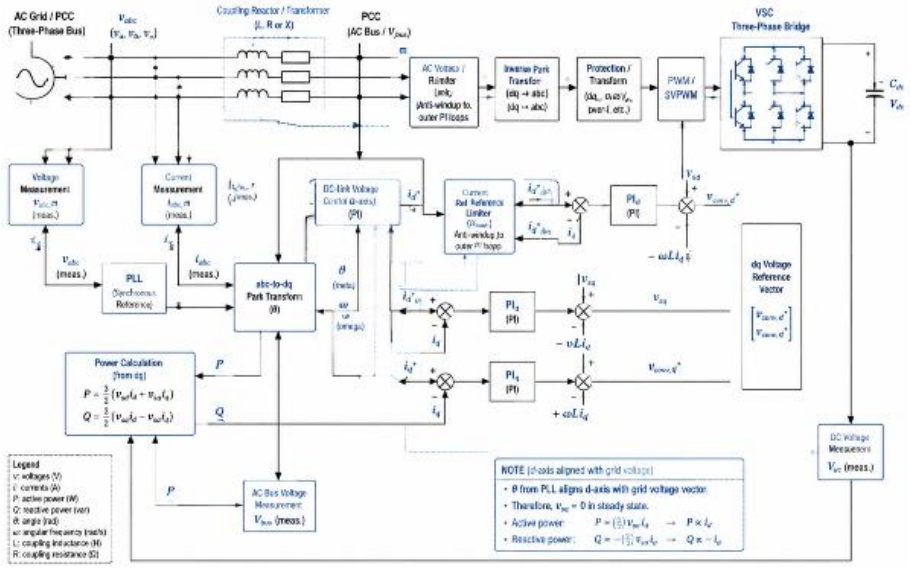
۱-۳- تحلیل پاسخ گذرا

تحلیل پاسخ گذرا یکی از اساسی‌ترین بخش‌های ارزیابی دینامیکی در سیستم‌های قدرت است، زیرا رفتار شبکه را در بازه زمانی کوتاه پس از وقوع اغتشاش‌های ناگهانی بررسی می‌کند. منظور از اغتشاش گذرا، رویدادهایی مانند اتصال کوتاه سه‌فاز یا تک‌فاز، خروج ناگهانی یک خط انتقال، قطع یا وصل ناگهانی بارهای بزرگ، تغییر شدید توان خروجی واحدهای تولید پراکنده، راه‌اندازی موتورهای پرقدرت، و همچنین نوسانات سریع ناشی از تغییرات منابع تجدیدپذیر است.



شکل (۲): شماتیک کامل ساختار و کنترل جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

Figure 2. Complete schematic of the structure and control of the static synchronous compensator



شکل (۳): بلوک‌دیاگرام کامل کنترل جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در چارچوب سنکرون دو محوری.

Figure 3. Complete block diagram of static synchronous compensator control in a two-axis synchronous framework.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

در چنین شرایطی، سیستم قدرت برای مدت کوتاهی از نقطه کار ماندگار خود خارج می‌شود و متغیرهایی مانند ولتاژ، جریان، توان اکتیو و راکتیو، فرکانس و زاویه روتور با تغییرات سریع و گاه شدید مواجه می‌شوند. تحلیل پاسخ گذرا با هدف بررسی این دوره زمانی انجام می‌شود تا مشخص گردد آیا سیستم پس از اغتشاش قادر است به شرایط پایدار جدید بازگردد یا خیر، و اگر پاسخ مثبت است، این بازگشت با چه کیفیت، سرعت و دامنه نوسانی صورت می‌گیرد [۲۵،۲۶].

در شبکه‌های مجهز به STATCOM، تحلیل پاسخ گذرا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا یکی از مهم‌ترین مزایای این تجهیز، توانایی آن در تزریق یا جذب بسیار سریع توان راکتیو در لحظات ابتدایی پس از اغتشاش است. در بسیاری از رخدادهای گذرا، مسئله اصلی آن است که افت ولتاژ یا نوسانات توان راکتیو در چند صد میلی‌ثانیه اول کنترل شوند؛ زیرا در غیر این صورت، پدیده‌هایی مانند توقف موتورهای القایی، عملکرد نامناسب رله‌ها، تشدید افت ولتاژ، و حتی گسترش اغتشاش به سایر نواحی شبکه رخ خواهد داد. از این رو، بررسی کمی کیفیت پاسخ گذرای سیستم، چه در حالت بدون STATCOM و چه در حضور آن، یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی کارایی این تجهیز محسوب می‌شود [۲۷،۲۸].

در تحلیل گذرا، معمولاً پاسخ زمانی ولتاژ باس‌های بحرانی، توان راکتیو تزریقی، جریان خروجی مبدل، و در مواردی نیز زاویه یا توان انتقالی خطوط مطالعه می‌شود. این پاسخ زمانی اطلاعات مهمی درباره سرعت مداخله STATCOM، میزان پشتیبانی ولتاژ، نحوه بازگشت سیستم به شرایط پایدار و نیز احتمال بروز نوسانات ثانویه فراهم می‌کند. مهم‌ترین شاخص‌هایی که در این سطح برای ارزیابی به‌کار می‌روند، شامل عمق افت ولتاژ، زمان بازیابی ولتاژ، بیش‌جهش و کم‌جهش ولتاژ، زمان نشست و دامنه نوسانات توان راکتیو هستند که در ادامه به‌تفصیل تشریح می‌شوند [۲۹،۳۰].

عمق افت ولتاژ نشان‌دهنده شدت کاهش سطح ولتاژ در لحظات پس از وقوع اغتشاش است و به‌عنوان یکی از شاخص‌های حیاتی در سنجش کیفیت پاسخ گذرا در سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود. این شاخص در واقع بیانگر میزان فاصله ولتاژ باس بحرانی از مقدار پیش از وقوع خطا است؛ به‌گونه‌ای که هرچه این افت عمیق‌تر باشد، احتمال بروز ناپایداری، قطع تجهیزات حساس، از کار افتادن بارهای موتوری و عملکرد ناخواسته رله‌های حفاظتی افزایش می‌یابد. در اینجا، نقش اصلی STATCOM این است که با تزریق سریع توان راکتیو، مانع از افت شدید ولتاژ شده و با افزایش کمترین مقدار ولتاژ ثبت‌شده، اثرات مخرب اغتشاش را کاهش دهد؛ در واقع هرچه عملکرد این تجهیز سریع‌تر و هوشمندانه باشد، عمق افت ولتاژ محدودتر خواهد بود. عمق افت ولتاژ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$DV = \frac{V_o - V_{min}}{V_o} \times 100 \qquad (۶)$$

که در آن V_{min} کمینه ولتاژ پس از وقوع اغتشاش و V_o ولتاژ بیش از اغتشاش است.

از سوی دیگر، زمان بازیابی ولتاژ بیانگر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا ولتاژ یک باس پس از وقوع اغتشاش، مجدداً به محدوده مجاز عملیاتی خود بازگردد. این محدوده معمولاً بر اساس درصدی از ولتاژ نامی یا مرجع تعیین می‌شود و اگر طول این بازه زمانی بیش از حد باشد، می‌تواند منجر به عملکرد سیستم‌های حفاظتی و اخلال در تداوم تغذیه بارها شود. STATCOM با جبران کسری توان راکتیو و کمک به بازگشت سریع پروفیل ولتاژ به وضعیت نرمال، زمان بازیابی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. این شاخص در شبکه‌هایی که با بارهای حساس سروکار دارند از اهمیت عملیاتی بالایی برخوردار است، چرا که استمرار وضعیت افت ولتاژ، حتی در صورت بازیابی نهایی، می‌تواند آسیب‌های جدی به تجهیزات مصرف‌کننده وارد کند [۳۱،۳۲]. اگر ε محدوده مجاز خطای ولتاژ باشد، زمان بازیابی ولتاژ به صورت زیر تعریف می‌شود:

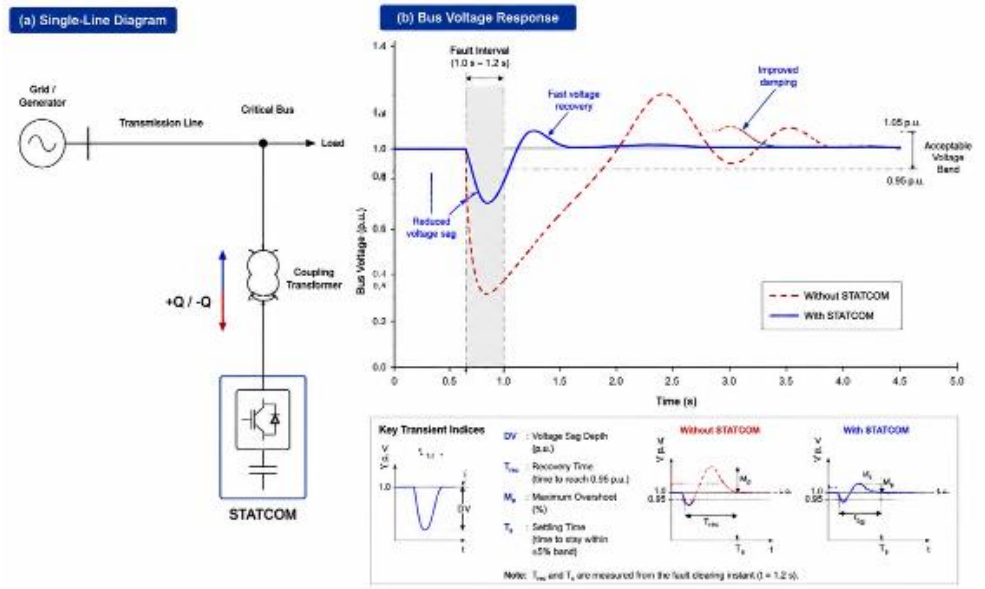
$$T_{rec} = \min\{t : |V(\tau) - V_{ref}| \le \varepsilon, \forall \{\tau \ge t\}\} \qquad (۷)$$

مفاهیم بیش‌جهش و کم‌جهش ولتاژ، کیفیت رفتار دینامیکی سیستم را از منظر انحراف نسبت به مقدار مرجع بررسی می‌کنند. کم‌جهش به‌طور معمول به شدت افت اولیه ولتاژ اشاره دارد، در حالی که بیش‌جهش زمانی رخ می‌دهد که ولتاژ در فرآیند بازیابی از مقدار مرجع خود فراتر می‌رود. وقوع بیش‌جهش‌های بزرگ، اگرچه ممکن است در نگاه نخست نشان‌دهنده سرعت بالای سیستم کنترل باشد، اما غالباً بیانگر تنظیمات نامناسب یا کمبود میرایی در سیستم است و می‌تواند موجب نوسانات ثانویه، اعمال تنش‌های عایقی بر تجهیزات و کاهش کیفیت توان شود. در طراحی کنترل‌کننده STATCOM، هدف دستیابی به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

پاسخی متعادل است که نه‌تنها از افت عمیق ولتاژ جلوگیری کند، بلکه از ایجاد بیش‌جهش‌های شدید نیز پرهیز نماید؛ بدین معنا که پاسخ مطلوب لزوماً سریع‌ترین پاسخ ممکن نیست، بلکه پاسخی است که میان سرعت، دقت و میرایی تعادل ایجاد کند.
زمان نشست شاخصی استاندارد در مهندسی کنترل است که نشان می‌دهد سیستم پس از بروز اغتشاش، چه مدت‌زمانی نیاز دارد تا خروجی آن در یک محدوده مجاز و تعریف‌شده پیرامون مقدار نهایی یا مرجع، پایدار بماند. در سیستم‌های قدرت، این بازه معمولاً درصدی از مقدار نهایی در نظر گرفته می‌شود و اگر پاسخ ولتاژ دچار نوسانات ماندگار باشد یا از میرایی ضعیفی برخوردار باشد، زمان نشست به‌طبع افزایش خواهد یافت. یک زمان نشست کوتاه، گویای آن است که سیستم نه‌تنها از بحران اولیه عبور کرده، بلکه نوسانات بعدی آن نیز به‌طور مؤثر مستهلک شده‌اند. STATCOM، در صورت بهره‌مندی از یک کنترل‌کننده بهینه، قادر است با تعدیل سریع توان راکتیو و کاهش تغییرات ولتاژ، میرایی نوسانات را افزایش داده و این شاخص را بهبود ببخشد؛ هرچند باید توجه داشت که ضرایب کنترلی تنظیم‌نشده ممکن است نتیجه معکوس داده و پاسخ سریع اولیه را با هزینه‌ی افزایش نوسانات ثانویه و طولانی‌تر شدن زمان نشست همراه سازند.
در نهایت، دامنه نوسانات توان راکتیو شاخصی برای بررسی شدت تغییرات در حین عملکرد دینامیکی تجهیز است. در طول یک رخداد گذرا، STATCOM ممکن است مقادیر متغیری از توان راکتیو را برای تثبیت ولتاژ تبادل کند؛ حال اگر این تغییرات بسیار شدید یا نوسانی باشند، می‌تواند نشان‌دهنده‌ی نزدیکی سیستم به حدود عملیاتی، ضعف در ساختار شبکه یا طراحی نامناسب سیستم کنترل باشد. اختلاف بین بیشینه و کمینه توان راکتیو در طول دوره گذرا، بیانگر سطح تنش دینامیکی وارد بر تجهیز است. در یک پاسخ گذرای مطلوب، انتظار می‌رود STATCOM ضمن تأمین سریع توان راکتیو مورد نیاز، از نوسانات تکرارشونده و شدید در خروجی خود خودداری کند؛ چرا که محدود کردن این دامنه نه‌تنها برای عملکرد کنترل‌کننده اهمیت دارد، بلکه تضمین‌کننده رعایت محدودیت‌های حرارتی و ظرفیت نامی تجهیز نیز هست [۳۳،۳۴].
نکته مهم در تحلیل پاسخ گذرا آن است که هیچ‌یک از شاخص‌های فوق به‌تنهایی نمی‌تواند معیار کامل عملکرد سیستم باشد. برای مثال، ممکن است یک STATCOM عمق افت ولتاژ را به‌خوبی کاهش دهد، اما در عوض بیش‌جهش زیادی ایجاد کند. یا ممکن است زمان بازیابی کوتاه شود، ولی نوسانات توان راکتیو بسیار شدید باشد و تجهیز را به محدوده اشباع نزدیک کند. بنابراین، تحلیل گذرا باید به‌صورت چندشاخصی انجام شود تا تصویر دقیق‌تری از عملکرد واقعی سیستم به‌دست آید.
در کاربردهای عملی، این شاخص‌ها معمولاً در سناریوهای مختلف مانند خطای سه‌فاز در باس بحرانی، خروج ناگهانی خط، قطع بارهای صنعتی بزرگ، و تغییرات سریع تولید منابع بادی یا خورشیدی استخراج می‌شوند. مقایسه مقادیر این شاخص‌ها در حضور و عدم حضور STATCOM، مبنای روشنی برای قضاوت درباره میزان اثربخشی تجهیز در بهبود رفتار دینامیکی شبکه فراهم می‌کند. هرچه کاهش عمق افت ولتاژ، کوتاه‌تر شدن زمان بازیابی و زمان نشست، محدود شدن بیش‌جهش، و کنترل بهتر نوسانات توان راکتیو بیشتر باشد، نقش STATCOM در پشتیبانی گذرای سیستم موفق‌تر ارزیابی می‌شود.
در مجموع، تحلیل پاسخ گذرا پلی میان طراحی کنترلی و بهره‌برداری عملی شبکه است. این تحلیل نشان می‌دهد که STATCOM تنها یک تجهیز جبرانسازی راکتیو در حالت ماندگار نیست، بلکه یک عنصر فعال و سریع در مدیریت رخدادهای دینامیکی شبکه محسوب می‌شود. ازاین‌رو، ارزیابی دقیق پاسخ گذرای آن برای تعیین محل نصب، ظرفیت نامی، تنظیم کنترل‌کننده و سنجش کارایی در سناریوهای بحرانی، کاملاً ضروری است [۳۵،۳۶].
شکل (۴) مکانیزم بهبود پایداری ولتاژ گذرا توسط STATCOM را در قالب ساختار تک‌خطی و پاسخ حوزه زمان نمایش می‌دهد. در پنل سمت چپ، نحوه اتصال موازی مبدل منبع ولتاژ (VSC) به باس بحرانی از طریق ترانسفورماتور تزویج نشان داده شده است که امکان تزریق دینامیکی توان راکتیو (Q+) را در حین افت ولتاژ فراهم می‌آورد. در پنل سمت راست، منحنی پاسخ ولتاژ در بازه وقوع اتصال کوتاه و پس از رفع خطا مقایسه شده است؛ در غیاب جبران‌ساز (خط‌چین قرمز)، سیستم با افت عمیق ولتاژ (DV)، نوسانات ماندگار با میرایی ضعیف و زمان نشست طولانی مواجه است. در مقابل، حضور STATCOM (خط ممتد آبی) به دلیل تزریق سریع جریان راکتیو متناسب با انحراف ولتاژ، عمق افت را به‌طور مؤثری محدود ساخته، زمان بازیابی ولتاژ (T_{rec}) به باند مجاز (۰/۹۵-۱/۰۵ پریونیت) را به حداقل رسانده و از طریق افزایش میرایی دینامیکی، زمان نشست (T_S) و بیش‌جهش (M_P) را به سطح بهینه کاهش داده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026



شکل (۴): پیکربندی اتصال موازی جبران‌ساز به باس بحرانی و مقایسه پاسخ زمانی ولتاژ باس در شرایط وقوع خطای گذرا در دو حالت با و بدون حضور جبران‌ساز.

Figure 4. Configuration of parallel connection of the compensator to the critical bus and comparison of the bus voltage time response under transient fault conditions in two cases with and without the presence of the compensator.

۲-۳- تحلیل پایداری ولتاژ

تحلیل پایداری ولتاژ[۹] به بررسی توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ قابل‌قبول در تمامی باس‌ها، هم در شرایط عادی و هم پس از وقوع اغتشاش، می‌پردازد. این نوع پایداری زمانی حاصل می‌شود که سیستم بتواند پس از تغییرات بار، خروج یا اتصال خطوط، از مدار خارج شدن واحدهای تولیدی، تغییرات توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و وقوع خطاهای الکتریکی، ولتاژ باس‌ها را در محدوده مجاز حفظ کند. به بیان دیگر، اگر سیستم پس از یک تغییر کوچک یا بزرگ بتواند به یک نقطه کار پایدار جدید بازگردد، از دیدگاه ولتاژ پایدار تلقی می‌شود؛ اما اگر ولتاژ به‌صورت مداوم کاهش یابد و سیستم نتواند نقطه کار قابل‌قبولی پیدا کند، احتمال وقوع ناپایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژی وجود خواهد داشت [۳۷،۳۸].

پایداری ولتاژ معمولاً به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: پایداری ولتاژ استاتیکی و پایداری ولتاژ دینامیکی. در تحلیل استاتیکی، پاسخ سیستم در برابر تغییرات آهسته و تدریجی بار یا تولید بررسی می‌شود. هدف اصلی این تحلیل، تعیین میزان بارگذاری قابل‌تحمل شبکه، شناسایی باس‌های بحرانی و محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ است. در مقابل، تحلیل دینامیکی پایداری ولتاژ، رفتار زمانی سیستم را پس از وقوع اغتشاش‌هایی مانند اتصال کوتاه، قطع خط انتقال، تغییر ناگهانی بار یا نوسان توان تولیدی بررسی می‌کند. در این حالت، علاوه بر مقدار نهایی ولتاژ، سرعت افت ولتاژ، عمق افت، مدت زمان ماندگاری اغتشاش و زمان بازیابی ولتاژ نیز اهمیت دارد [۳۹،۴۰].

یکی از عوامل اصلی بروز ناپایداری ولتاژ، کمبود توان راکتیو در بخش‌هایی از شبکه است که با بارگذاری بالا، طولانی بودن خطوط انتقال یا ضعف در اتصالات الکتریکی مواجه هستند. از آنجا که توان راکتیو نقش حیاتی در ایجاد و حفظ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تجهیزات شبکه ایفا می‌کند، افزایش تقاضا برای آن موجب بالا رفتن جریان عبوری از خطوط و ترانسفورماتورها می‌شود؛ این افزایش جریان، به نوبه خود افت ولتاژ بیشتری را در امپدانس شبکه ایجاد کرده و با کاهش ولتاژ، جریان مصرفی بارهای حساس به‌ویژه موتورهای القایی را افزایش می‌دهد. این فرآیند در قالب یک حلقه بازخوردی تشدیدکننده عمل می‌کند که طی آن، افزایش بار یا کاهش تولید توان راکتیو منجر به افزایش جریان شبکه و افت ولتاژ می‌شود؛ با کاهش ولتاژ در باس‌های بحرانی، تقاضای توان راکتیوِ برخی بارها افزایش یافته و این امر مجدداً باعث تشدید جریان و کاهش بیشتر ولتاژ می‌گردد. در صورت تداوم این چرخه‌ی مخرب، نقطه کار سیستم به ناحیه‌ی بحرانی منحنی توان–ولتاژ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

منتقل می‌شود که در آن، حتی تغییرات ناچیز در بار یا ولتاژ می‌تواند موجب فروپاشی ولتاژ و از دست رفتن نقطه کار پایدار سیستم گردد [۴۱].

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی به‌عنوان یک جبران‌ساز موازی مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ، با کنترل دقیق دامنه و فاز ولتاژ خروجی خود، توان راکتیو مورد نیاز شبکه را تأمین یا جذب می‌کند. در شرایط افت ولتاژ، کنترل‌کننده STATCOM با تشخیص اختلاف میان ولتاژ اندازه‌گیری‌شده و ولتاژ مرجع، اقدام به تزریق توان راکتیو به شبکه می‌کند؛ در مقابل، زمانی که ولتاژ باس بیش از حد مجاز افزایش یابد، این تجهیز می‌تواند با جذب توان راکتیو، به تعدیل ولتاژ کمک کند. عملکرد STATCOM اساساً بر مبنای تنظیم ولتاژ خروجی مبدل نسبت به ولتاژ باس شبکه استوار است، به‌طوری که با افزایش دامنه ولتاژ مبدل نسبت به ولتاژ باس، جریان راکتیو به شبکه تزریق می‌شود. یکی از مزیت‌های کلیدی STATCOM در مقایسه با جبران‌سازهای خازنی سنتی، عملکرد برتر آن در شرایط افت شدید ولتاژ است؛ چرا که توان خازن‌های معمولی با کاهش ولتاژ به‌صورت مربعی افت می‌کند و کارایی خود را از دست می‌دهند، اما STATCOM قادر است جریان راکتیو خود را حتی در سطوح پایین ولتاژ نزدیک به مقدار نامی حفظ کرده و پشتیبانی دینامیکی مؤثری ارائه دهد [۴۲،۴۳].

علاوه بر این، حضور STATCOM در شبکه موجب کاهش شیب افت ولتاژ در هنگام افزایش بار یا بروز اغتشاش می‌شود. شیب افت ولتاژ که نشان‌دهنده حساسیت سیستم نسبت به تغییرات بار است، تعیین می‌کند که به ازای هر میزان تغییر در بار یا توان، چه تغییری در ولتاژ رخ می‌دهد. STATCOM با تأمین توان راکتیو محلی، نیاز به انتقال توان از فواصل دور را کاهش داده و با محدود کردن جریان عبوری از خطوط و ترانسفورماتورها، از افت ولتاژ شدید در اثر امپدانس شبکه جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه، حتی با افزایش بار، کاهش ولتاژ محدودتر باقی می‌ماند.

در نهایت، استفاده از STATCOM باعث افزایش حاشیه پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت می‌شود. حاشیه پایداری که نشان‌دهنده فاصله نقطه کار فعلی سیستم تا نقطه بحرانی یا فروپاشی ولتاژ است، با نصب و کنترل صحیح STATCOM بهبود می‌یابد؛ چرا که این تجهیز نقطه بحرانی منحنی‌های پایداری را به سمت بارگذاری‌های بالاتر جابه‌جا می‌کند. با این حال، باید در نظر داشت که این بهبود حاشیه پایداری نامحدود نیست و توسط عواملی نظیر ظرفیت نامی مبدل، محدودیت جریان، ظرفیت ترانسفورماتور کوپلینگ و محدودیت‌های حرارتی تعیین می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اگر STATCOM به حد اشباع جریان یا ظرفیت خود برسد، دیگر قادر به تزریق توان راکتیو اضافی برای مقابله با شرایط وخیم‌تر نخواهد بود و تحلیل پایداری باید حتماً این محدودیت‌ها را در نظر بگیرد [۴۴،۴۵].

اگرچه STATCOM پاسخ بسیار سریعی دارد، عملکرد آن به کیفیت طراحی کنترل‌کننده و شرایط شبکه وابسته است. در شبکه‌های بسیار ضعیف، کنترل نامناسب ممکن است باعث نوسانات ولتاژ یا ناپایداری حلقه کنترلی شود. همچنین، هماهنگی میان کنترل ولتاژ STATCOM، تپ‌چنجر ترانسفورماتور، رگولاتورهای ولتاژ، سیستم تحریک ژنراتورها و سایر ادوات FACTS اهمیت زیادی دارد. عملکرد هم‌زمان این تجهیزات بدون هماهنگی می‌تواند منجر به رقابت کنترلی، افزایش نوسانات یا بهره‌برداری نامناسب از ظرفیت راکتیو شود [۴۶،۴۷].

برای ارزیابی تأثیر عملکرد STATCOM بر پایداری ولتاژ شبکه، مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی تحلیل می‌شوند که امکان بررسی کمی و دقیق اثربخشی این جبران‌ساز را فراهم می‌کنند. مهم‌ترین این شاخص‌ها شامل حداقل ولتاژ ثبت‌شده در باس‌های بحرانی پس از وقوع اغتشاش، عمق افت ولتاژ و همچنین مدت‌زمان موردنیاز برای بازیابی ولتاژ و بازگشت آن به محدوده مجاز عملیاتی است. علاوه بر این، ارزیابی حاشیه بارگذاری شبکه و میزان توان راکتیو موجود پیش از رسیدن به نقطه ناپایداری، بینش عمیقی نسبت به وضعیت پایداری سیستم ارائه می‌دهد. شاخص حساسیت ولتاژ نسبت به توان راکتیو نیز از دیگر معیارهای فنی است که بیانگر میزان واکنش سیستم به تغییرات توان راکتیو است [۴۸،۴۹]. به‌صورت تقریبی، حساسیت ولتاژ نسبت به تغییرات توان راکتیو را می‌توان به شکل زیر بیان کرد [۵۰،۵۱]:

$$\Delta V \approx \frac{X_{th}}{V_o}\Delta Q \qquad (۸)$$

که در آن X_{th} راکتانس تونن شبکه، V_o ولتاژ پیش از اغتشاش و ΔQ تغییرات توان راکتیو است.

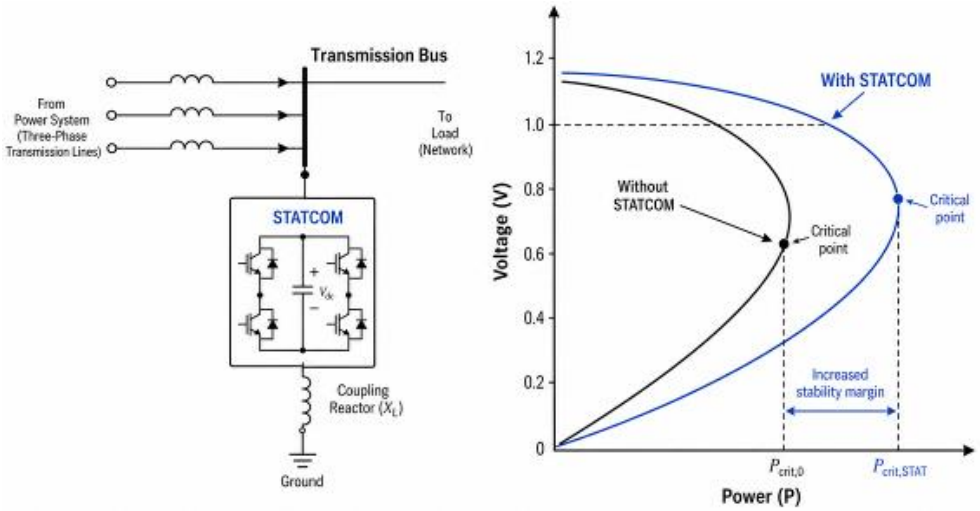
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

همچنین، پایش مستمر میزان استفاده از ظرفیت نامی STATCOM، شمارش دفعات و مدت‌زمان خارج شدن ولتاژ از محدوده استاندارد، و نیز محاسبه نرخ تغییرات ولتاژ در لحظات بروز اختلال، از جمله تحلیل‌هایی است که در کنار یکدیگر کمک می‌کنند تا با مقایسه وضعیت شبکه در دو حالت مجهز و غیرمجهز به STATCOM، عملکرد واقعی و میزان کارایی این تجهیز در بهبود پروفیل ولتاژ و حفظ پایداری سیستم به‌صورت دقیق ارزیابی شود.

از سوی دیگر، در شبکه‌هایی که سهم منابع مبتنی بر مبدل زیاد است، تعامل دینامیکی میان STATCOM و کنترل‌کننده‌های مبدل‌های بادی و فتوولتائیک نیز باید بررسی شود. وجود کنترل‌های سریع متعدد ممکن است موجب ایجاد مودهای نوسانی جدید در محدوده فرکانس پایین یا متوسط شود. بنابراین، ارزیابی پایداری ولتاژ باید علاوه بر مطالعات پخش بار و منحنی‌های P-V و Q-V، شامل شبیه‌سازی زمانی، تحلیل مقادیر ویژه و بررسی پاسخ سیستم در برابر خطاهای مختلف باشد.

در مجموع، STATCOM با تأمین سریع توان راکتیو، کاهش حساسیت ولتاژ نسبت به تغییرات بار، محدود کردن عمق افت ولتاژ و افزایش حاشیه بارگذاری، نقش مهمی در ارتقای پایداری ولتاژ ایفا می‌کند. بااین‌حال، میزان این بهبود به محل نصب، ظرفیت تجهیز، قدرت اتصال کوتاه شبکه، نوع بار، ساختار کنترل و محدودیت‌های عملیاتی وابسته است. ازاین‌رو، انتخاب محل و ظرفیت STATCOM باید بر اساس تحلیل جامع شاخص‌های ولتاژی و دینامیکی انجام شود و صرفاً بر مبنای نتایج یک حالت ماندگار یا یک سناریوی خطا قرار نگیرد.

شکل (۵) شماتیک ساده‌سازی‌شده‌ای از اتصال موازی جبران‌ساز به یکی از باس‌های شبکه انتقال را نشان می‌دهد که در آن ساختار به تجهیز اجازه می‌دهد تا با تزریق یا جذب سریع توان راکتیو، ولتاژ باس را در شرایط دینامیکی تنظیم کند. همچنین اثر جبران‌سازی بر منحنی‌های معروف P-V نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی با حضور STATCOM نسبت به حالت پایه (بدون جبران‌ساز)، به سمت راست و بالا متمایل شده است. این تغییر وضعیت، نقطه بحرانی پایداری را به مقادیر بالاتری از توان اکتیو منتقل کرده و با افزایش فاصله میان نقطه کار فعلی و نقطه فروپاشی ولتاژ، حاشیه امنیت شبکه را در برابر ناپایداری‌های ولتاژی به‌طور قابل‌توجهی تقویت کرده است.



شکل (۵): شماتیک اتصال موازی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی به سیستم قدرت و تحلیل تأثیر آن بر بهبود حاشیه پایداری ولتاژ منحنی ولتاژ برحسب توان اکتیو

Figure 5. Schematic of parallel connection of static synchronous compensator to the power system and analysis of its effect on improving the voltage stability margin of the voltage curve in terms of active power.

۳-۳- تحلیل هماهنگی کنترلی

در سیستم‌های قدرت مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی، تحلیل دینامیکی تنها به بررسی پاسخ پاسخ سیستم به اغتشاشات فیزیکی محدود نمی‌شود، بلکه بررسی تعامل و هماهنگی میان لایه‌های مختلف کنترلی نیز از اهمیت حیاتی برخوردار است. از آنجا که عملکرد STATCOM مستقیماً از طریق ساختارهای کنترلی متنوعی نظیر کنترل‌کننده‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

تناسبی–انتگرالی (PI)، کنترل برداری در چارچوب مرجع سنکرون و یا راهبردهای پیشرفته‌تر مانند کنترل اینرسی مجازی و کنترل‌های تطبیقی محقق می‌گردد، بررسی پایداری حلقه‌های کنترلی و پایداری سیگنال کوچک به عنوان ستون اصلی تحلیل دینامیکی شناخته می‌شود. در این حوزه، تحلیل باید به‌گونه‌ای انجام شود که پایداری حلقه‌های داخلی (کنترل جریان) با حلقه‌های بیرونی (کنترل ولتاژ و لینک DC) و همچنین با سایر تجهیزات کنترلی موجود در شبکه (مانند کنترل‌کننده‌های سایر جبران‌سازها یا اینورترهای منابع پراکنده) هماهنگ باشد. انتخاب نامناسب ضرایب کنترلی یا نبود تنظیم دقیق میان پهنای باند حلقه‌های مختلف می‌تواند منجر به بروز پدیده‌های نامطلوبی همچون نوسانات تشدیدی تداخل بین کنترل‌کننده‌ها و یا پاسخ‌های کند و ناپایدار در برابر تغییرات بار شود. از این رو، تحلیل دینامیکی باید تضمین کند که تعامل میان ساختارهای کنترلی مختلف، منجر به افزایش حاشیه پایداری و بهبود کیفیت پاسخ گذرا گردد، نه بروز ناپایداری‌های تشدیدی در نقاط اتصال مشترک [۵۲،۵۳].

۴- شاخص‌های بهره‌برداری در ارزیابی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

شاخص‌های بهره‌برداری، ابزارهای کمی اصلی برای سنجش میزان اثربخشی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در بهبود عملکرد شبکه قدرت به شمار می‌آیند. این شاخص‌ها نشان می‌دهند که STATCOM تا چه حد توانسته است کیفیت ولتاژ، قابلیت اطمینان تغذیه و شرایط کاری باس‌ها را در محدوده مطلوب نگه دارد و از بروز ناپایداری‌های موضعی یا گسترده جلوگیری کند. از این‌رو، ارزیابی عملکرد این تجهیز صرفاً با مشاهده پاسخ کیفی کافی نیست و باید بر پایه شاخص‌های سنجش‌پذیر و قابل مقایسه انجام شود. این شاخص‌ها را می‌توان در چند گروه اصلی دسته‌بندی کرد که هر یک جنبه‌ای از رفتار سامانه را در حالت ماندگار و گذرا آشکار می‌سازند.

۴-۱- شاخص‌های ولتاژی

شاخص‌های ولتاژی مهم‌ترین گروه در ارزیابی عملکرد STATCOM هستند، زیرا مأموریت اصلی این تجهیز حفظ پروفیل ولتاژ در محدوده مجاز و جلوگیری از افت یا افزایش بیش از حد آن است. این شاخص‌ها نشان می‌دهند که جبران‌ساز تا چه اندازه توانسته ولتاژ باس‌ها را در بازه مطلوب نگه دارد و در برابر تغییرات بار، اغتشاشات شبکه و خطاهای گذرا از فروپاشی ولتاژ جلوگیری کند. در این میان، انحراف ولتاژ به‌صورت اختلاف میان ولتاژ واقعی و ولتاژ مرجع تعریف می‌شود و هرچه مقدار آن کوچک‌تر باشد، کارایی تنظیم ولتاژ بالاتر است. افزون بر این، شاخص پایداری ولتاژ[۱۰]، حداقل ولتاژ باس بحرانی و زمان بازیابی ولتاژ نیز از معیارهای کلیدی محسوب می‌شوند، زیرا نشان می‌دهند شبکه تا چه حد در برابر افت ولتاژ مقاوم مانده و پس از وقوع اغتشاش با چه سرعتی به وضعیت پایدار بازگشته است. این شاخص‌ها به‌ویژه در شبکه‌های انتقال و توزیع، و به‌خصوص در حضور بارهای حساس و بارهای دارای رفتار دینامیکی شدید، اهمیت بالایی دارند [۵۴،۵۵].

۴-۲- شاخص‌های توان راکتیو

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در اصل یک تجهیز مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ است که از طریق تزریق یا جذب سریع جریان راکتیو، نقش مؤثری در تنظیم ولتاژ، افزایش حاشیه پایداری و بهبود رفتار دینامیکی شبکه ایفا می‌کند. برخلاف بانک‌های خازنی و راکتورهای ثابت که توان راکتیو قابل تبادل آن‌ها به مجذور ولتاژ باس وابسته است، STATCOM در محدوده مجاز جریان مبدل می‌تواند حتی در شرایط افت ولتاژ نیز پشتیبانی راکتیو مؤثرتری ارائه دهد. بنابراین، ارزیابی عملکرد آن نباید تنها بر مبنای ظرفیت نامی تجهیز انجام شود، بلکه لازم است سرعت پاسخ، میزان ذخیره ظرفیت، پایداری تزریق توان راکتیو و احتمال ورود تجهیز به محدوده اشباع نیز بررسی شود.

در تحلیل بهره‌برداری، عملکرد STATCOM بر اساس مدیریت مؤلفه راکتیو جریان در پایانه اتصال تعیین می‌شود. این تجهیز با تزریق توان راکتیو در صورت پیشی گرفتن ولتاژ خروجی مبدل از ولتاژ باس، و جذب آن در هنگام بالا بودن ولتاژ باس، نقشی دوطرفه و حیاتی در تثبیت ولتاژ ایفا می‌کند؛ مزیتی که در مقایسه با بانک‌های خازنی ثابت، موجب حفظ قابلیت تزریق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

جریان حتی در سطوح پایین ولتاژ می‌شود. در ارزیابی عملکرد، شاخص‌هایی نظیر حاشیه توان راکتیو که نشان‌دهنده ظرفیت باقیمانده تجهیز تا رسیدن به حد نهایی جریان است، اهمیت بالایی دارد؛ چرا که کاهش این حاشیه به معنای نزدیک شدن به مرز اشباع و کاهش اثربخشی کنترل در شرایط بحرانی جدید است.

$$Q_{margin} = Q_{max} - |Q_{op}| \quad (۹)$$

همچنین، نرخ تغییرات توان راکتیو به عنوان معیاری برای سنجش سرعت واکنش تجهیز در لحظات اولیه بروز خطا مدنظر قرار می‌گیرد، هرچند باید میان این سرعت و پایداری دینامیکی، با پرهیز از نوسانات شدید یا افزایش بیش از حد بهره‌های کنترلی، تعادل برقرار کرد. نرخ تغییرات توان راکتیو از اختلاف بیشینه توان راکتیو ($Q_{max,tr}$) و کمینه توان راکتیو ($Q_{min,tr}$) در دوره گذرا محاسبه می‌شود:

$$\Delta Q = Q_{max,tr} - Q_{min,tr} \quad (۱۰)$$

دامنه نوسانات توان راکتیو نیز بیانگر کیفیت تعامل تجهیز با شبکه است و مقادیر بالای آن می‌تواند نشانه ضعف کنترل‌کننده یا تنش حرارتی بر ادوات نیمه‌هادی و ترانسفورماتور کوپلینگ باشد. از سوی دیگر، محدودیت‌های حرارتی و حفاظتی کلیدهای قدرت موجب بروز پدیده اشباع مبدل در شرایط اغتشاش شدید می‌شود که در این وضعیت، تجهیز قادر به تأمین کامل جریان راکتیو درخواستی نبوده و پیامدهایی نظیر عمق بیشتر افت ولتاژ و طولانی شدن زمان بازیابی را در پی دارد؛ لذا طراحی بهینه و انتخاب محل نصب مناسب نیازمند تحلیل تلفیقی این شاخص‌ها و بررسی هم‌زمان جریان و توان راکتیو برای تضمین عملکرد مطلوب، پایدار و میرا در شبکه قدرت است. شاخص‌های اصلی ارزیابی توان راکتیو در STATCOM در جدول (۱) آمده است.

Table 1. Main indicators for evaluating the reactive power of static synchronous compensator

جدول (۱): شاخص‌های اصلی ارزیابی توان راکتیو جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

شاخص	تفسیر بهره‌برداری	وضعیت مطلوب
توان راکتیو تزریقی یا جذبی	مقدار واقعی پشتیبانی راکتیو تجهیز در هر لحظه را نشان می‌دهد. علامت مثبت بیانگر تزریق و علامت منفی نشان‌دهنده جذب توان راکتیو است.	تأمین توان راکتیو متناسب با نیاز شبکه، بدون نوسان یا تغییر جهت غیرضروری
توان راکتیو بیشینه قابل دسترس	حداکثر توان راکتیوی که تجهیز، با توجه به حد جریان مبدل و ولتاژ لحظه‌ای باس، می‌تواند مبادله کند.	کافی بودن ظرفیت تجهیز در بدترین سناریوی خطا یا بارگذاری
حاشیه توان راکتیو	فاصله بین توان راکتیو مورد نیاز در نقطه کار و حد قابل تأمین تجهیز را مشخص می‌کند.	مثبت و به‌اندازه کافی بزرگ؛ حاشیه اندک (نزدیکی به محدودیت عملکرد)
نرخ تغییر توان راکتیو	سرعت واکنش جبران‌ساز سنکرون استاتیکی به تغییر ولتاژ، وقوع خطا یا تغییر بار را بیان می‌کند.	بالا در لحظه اغتشاش، اما بدون نوسانات شدید یا تحریک کنترل‌کننده
خطای رهگیری توان راکتیو	میزان انطباق توان راکتیو واقعی با فرمان کنترلی یا مقدار مرجع را نشان می‌دهد.	نزدیک به صفر در حالت ماندگار و دارای میرایی مناسب در دوره گذرا
دامنه نوسان توان راکتیو	شدت تغییرات رفت‌وبرگشتی توان راکتیو در طول اغتشاش را اندازه‌گیری می‌کند.	محدود و میرا؛ دامنه زیاد می‌تواند نشانه تنظیم نامطلوب کنترل باشد
زمان پاسخ راکتیو	زمان لازم برای رسیدن توان راکتیو به محدوده مشخصی از مقدار مرجع پس از رخداد است.	کوتاه، با کمترین بیش‌جهش و کمترین نوسان
شاخص اشباع مبدل	میزان استفاده از ظرفیت جریان مبدل را نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک یا بزرگ‌تر از یک، بیانگر ورود به محدوده محدودیت جریان هستند.	کمتر از یک در بهره‌برداری عادی؛ اشباع کوتاه‌مدت و کنترل‌شده در رخداد شدید
انرژی یا ظرفیت سمت جریان مستقیم	پایداری ولتاژ لینک جریان مستقیم بر امکان تداوم عملکرد مبدل و کیفیت تزریق جریان اثر می‌گذارد.	حفظ ولتاژ DC در بازه مجاز و جلوگیری از افت یا افزایش شدید آن

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

Table 2. Comparison of performance of reactive power compensation equipment

جدول (۲): مقایسه عملکرد تجهیزات جبران‌سازی توان راکتیو

تجهیزات جبران-سازی / معیار مقایسه	جبران‌ساز سنکرون استاتیکی	جبران‌ساز وار استاتیکی	بانک خازی	راکتور شنت
نوع تجهیز	مبدل منبع ولتاژ مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت	مبدل امپدانس متغیر مبتنی بر تریستور	عنصر ثابت خازنی	عنصر ثابت سلفی
نوع توان راکتیو	تزریق و جذب توان راکتیو	تزریق و جذب توان راکتیو	عمدتاً تزریق توان راکتیو	عمدتاً جذب توان راکتیو
سرعت پاسخ	بسیار زیاد؛ معمولاً در محدوده چند میلی‌ثانیه تا چند سیکل	زیاد؛ معمولاً چند سیکل تا چند ده میلی‌ثانیه	وابسته به کلیدزنی، معمولاً کندتر از جبران‌ساز سنکرون استاتیکی	وابسته به کلیدزنی، معمولاً کندتر از جبران‌ساز سنکرون استاتیکی
قابلیت عملکرد در افت ولتاژ	بسیار مناسب، حفظ جریان راکتیو در محدوده نامی	کاهش توان راکتیو با افت ولتاژ	کاهش شدید توان راکتیو	کاهش توان جذب‌شده با افت ولتاژ
وابستگی توان راکتیو به ولتاژ	نسبتاً کم در محدوده محدودیت جریان	زیادتر از جبران‌ساز سنکرون استاتیکی	زیاد	زیاد
امکان تنظیم پیوسته	بله، با کنترل مبدل	معمولاً به‌صورت پله‌ای	معمولاً به‌صورت پله‌ای	معمولاً به‌صورت پله‌ای
کنترل ولتاژ باس	سریع، دقیق و دوطرفه	محدود به تزریق ثابت یا پله‌ای	محدود به تزریق ثابت یا پله‌ای	مناسب برای کاهش اضافه‌ولتاژ
عملکرد در پایداری گذرا	بسیار مؤثر در محدودکردن افت ولتاژ و کاهش زمان بازیابی	محدود و عمدتاً مناسب شرایط ماندگار	محدود و عمدتاً مناسب شرایط ماندگار	محدود و بیشتر مناسب کنترل اضافه‌ولتاژ
عملکرد در پایداری ولتاژ	افزایش حاشیه پایداری به‌ویژه در شبکه‌های ضعیف	مناسب برای جبران بار پایه	مناسب برای جبران بار پایه	کاهش ولتاژ در شرایط بار کم یا اضافه‌ولتاژ
احتمال اشباع یا محدودیت جریان	دارای محدودیت جریان مبدل و امکان اشباع کنترلی	اشباع مبدل ندارد، اما جریان و تنش خازنی محدود است	اشباع مبدل ندارد، اما جریان و تنش خازنی محدود است	اشباع مبدل ندارد، اما جریان و تنش حرارتی محدود است
دامنه نوسانات توان راکتیو	قابل کنترل و قابل میرایش	تغییرات پله‌ای و محدود	تغییرات پله‌ای و محدود	تغییرات پله‌ای و محدود
قابلیت میرایی نوسانات	بالا، به‌ویژه با کنترل مکمل	بسیار محدود	بسیار محدود	محدود
تولید هارمونیک	وابسته به توپولوژی مبدل و فیلترها	معمولاً کم، وجود امکان تشدید هارمونیکی	معمولاً کم، وجود امکان تشدید هارمونیکی	کم، ولی وجود امکان تشدید با خازن‌ها
نیاز به فیلتر	نیازمند فیلترهای مناسب در سمت جریان متناوب	گاهی برای جلوگیری از تشدید	گاهی برای جلوگیری از تشدید	معمولاً کم
انعطاف‌پذیری در تغییرات بار	بسیار زیاد	زیاد	کم	کم
تلفات بهره‌برداری	متوسط و وابسته به مبدل	متوسط	کم	کم
پیچیدگی کنترل	زیاد	متوسط تا زیاد	کم	کم
هزینه اولیه	زیاد	متوسط تا زیاد	کم	کم
کاربرد مناسب	شبکه‌های ضعیف، منابع تجدیدپذیر، بارهای حساس و رخدادهای گذرا	جبران‌سازی دینامیکی عمومی در شبکه انتقال و فوق‌توزیع	جبران بارهای با نیاز راکتیو نسبتاً ثابت	کنترل اضافه‌ولتاژ و جبران ظرفیت خازنی خطوط بلند
مناسب‌ترین نقش عملیاتی	پشتیبانی سریع ولتاژ و توان راکتیو در شرایط دینامیکی	تنظیم ولتاژ و جبران‌سازی دینامیکی با هزینه کمتر	جبران‌سازی اقتصادی در حالت ماندگار	جذب توان راکتیو و کنترل ولتاژ در بار کم

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

جدول (۲) عملکرد تجهیزات متداول جبران‌سازی توان راکتیو، شامل STATCOM، SVC، بانک خازنی و راکتور شنت را از نظر سرعت پاسخ، قابلیت کنترل، رفتار در شرایط افت ولتاژ، دامنه عملکرد و هزینه مقایسه می‌کند. تفاوت اصلی این تجهیزات در سرعت پاسخ، قابلیت کنترل دوطرفه توان راکتیو، وابستگی ظرفیت خروجی به ولتاژ باس و نحوه عملکرد آن‌ها در شرایط گذرا است. همانطور که مشاهده می‌شود بانک خازنی و راکتور شنت عمدتاً برای جبران‌سازی ماندگار و پله‌ای، SVC برای جبران‌سازی دینامیکی متعارف، و STATCOM برای پشتیبانی سریع، پیوسته و دوطرفه توان راکتیو در شرایط گذرا و بحرانی مناسب هستند. البته برتری STATCOM از نظر دینامیکی با افزایش پیچیدگی کنترل، هزینه اولیه، تلفات مبدل و ضرورت مدیریت محدودیت جریان همراه است؛ بنابراین، ارزیابی نهایی باید هم‌زمان معیارهای فنی و اقتصادی را دربرگیرد.

۳-۴- شاخص‌های پایداری دینامیکی

پایداری دینامیکی به توانایی سیستم قدرت برای حفظ یا بازیابی یک وضعیت بهره‌برداری قابل‌قبول پس از وقوع اغتشاش‌های کوچک و بزرگ اشاره دارد. تغییر ناگهانی بار، نوسان توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، خروج خطوط انتقال، وقوع و رفع خطا، تغییر نقطه کار مبدل‌ها و برهم‌کنش میان کنترل‌کننده‌های سریع از مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند مودهای نوسانی شبکه را تحریک کنند. این نوسانات ممکن است در متغیرهایی مانند ولتاژ باس، توان اکتیو و راکتیو خطوط، فرکانس، زاویه روتور و جریان خروجی مبدل‌ها ظاهر شوند. در شبکه‌های ضعیف، به دلیل امپدانس معادل زیاد شبکه و نسبت اتصال کوتاه پایین، تغییرات توان اکتیو و راکتیو اثر شدیدتری بر دامنه و زاویه ولتاژ دارند. در نتیجه، احتمال بروز نوسانات کم‌میرایی، اندرکنش نامطلوب کنترل‌کننده‌ها و ناپایداری مبدل‌محور افزایش می‌یابد. جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با کنترل سریع جریان راکتیو و تنظیم ولتاژ باس می‌تواند دامنه این نوسانات را کاهش دهد. بااین‌حال، افزایش میرایی به‌صورت خودکار تضمین نمی‌شود، زیرا کنترل‌کننده STATCOM باید از نظر بهره، پهنای باند و تأخیر زمانی به‌درستی تنظیم شده باشد. در کاربردهایی که هدف اصلی میرایی نوسانات الکترومکانیکی است، معمولاً یک کنترل‌کننده مکمل میرایی نوسانات توان[۱۱] (POD)، به حلقه کنترل اصلی STATCOM افزوده می‌شود. عملکرد کنترلی STATCOM را می‌توان به‌صورت ساده از رابطه زیر نمایش داد [۵۶،۵۷]:

$$I_q = \begin{cases} +I_{q,max} & V < V_{ref} \\ K_v(V_{ref} - V) & V \approx V_{ref} \\ -I_{q,max} & V > V_{ref} \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن I_q مؤلفه راکتیو جریان جبران‌ساز، $I_{q,max}$ حد جریان مبدل، V_{ref} ولتاژ مرجع و K_V بهره حلقه کنترل ولتاژ است. در حالت عادی، جریان راکتیو بر اساس خطای ولتاژ تنظیم می‌شود، اما در شرایط اغتشاش شدید، جریان خروجی توسط محدودکننده جریان مبدل تعیین می‌گردد.

ارزیابی پایداری دینامیکی را می‌توان با دو رویکرد مکمل انجام داد. در تحلیل سیگنال کوچک، مدل سیستم در اطراف نقطه کار خطی‌سازی شده و مقادیر ویژه، فرکانس طبیعی و ضریب میرایی مودها استخراج می‌شوند. در تحلیل حوزه زمان، پاسخ سیستم پس از اعمال یک اغتشاش مشخص شبیه‌سازی شده و شاخص‌هایی مانند دامنه نوسانات، زمان نشست و نرخ کاهش پوش نوسان محاسبه می‌شوند. ترکیب این دو رویکرد، تصویر دقیق‌تری از اثر STATCOM بر رفتار دینامیکی شبکه ارائه می‌دهد.

ضریب میرایی نوسانات یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در تحلیل مودال سیستم قدرت به شمار می‌رود و برای سنجش میزان پایداری نوسانی سیستم به کار می‌رود. این شاخص در واقع نشان می‌دهد که دامنه نوسانات هر مود با گذشت زمان با چه سرعتی کاهش می‌یابد یا برعکس، آیا تمایل به رشد دارد. اگر یک مود دارای میرایی مناسب باشد، دامنه نوسان آن به‌تدریج مستهلک می‌شود و سیستم از نظر آن مود پایدار تلقی می‌گردد؛ اما اگر میرایی بسیار کم باشد، نوسان برای مدت طولانی باقی می‌ماند و در صورت نامناسب بودن شرایط، حتی ممکن است دامنه آن افزایش یافته و به ناپایداری منجر شود. به همین دلیل، صرف بررسی نرخ کاهش نوسان کافی نیست و برای مقایسه مودهایی با فرکانس‌های متفاوت، ضریب میرایی معیار دقیق‌تر و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

کاربردی‌تری محسوب می‌شود. در مطالعات سیستم‌های قدرت، مودهایی که میرایی پایینی دارند معمولاً به‌عنوان مودهای بحرانی شناخته می‌شوند، هرچند حد قابل‌قبول این شاخص بسته به نوع شبکه، الزامات بهره‌برداری و معیارهای فنی می‌تواند متفاوت باشد.

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی از طریق تنظیم سریع توان راکتیو، نوسانات ولتاژ باس و تغییرات توان عبوری از خطوط را کاهش می‌دهد و به این ترتیب در بهبود میرایی نوسانات نقش مؤثری ایفا می‌کند. هنگامی که این تجهیز به کنترل‌کننده‌های کمکی نظیر پایدارساز نوسان توان مجهز شود، می‌تواند با استفاده از سیگنال‌هایی مانند تغییرات توان اکتیو، فرکانس باس، سرعت ژنراتور یا زاویه ولتاژ، مؤلفه‌ای کنترلی تولید کند که در فاز مناسب با نوسان قرار گرفته و اثری معادل افزایش میرایی در سیستم ایجاد کند. در نتیجه، STATCOM نه‌فقط برای تنظیم ولتاژ، بلکه برای تقویت پایداری نوسانی نیز اهمیت می‌یابد [۵۸،۵۹].

زمان نشست مودها نیز از دیگر شاخص‌های مهم در این زمینه است و بیان می‌کند که یک مؤلفه نوسانی چه مدت زمان نیاز دارد تا پس از اغتشاش، به‌طور پایدار در اطراف مقدار نهایی خود قرار گیرد. هرچه نرخ زوال نوسان بیشتر باشد، زمان نشست کوتاه‌تر خواهد بود. با این حال، باید توجه داشت که زمان نشست مودال الزاماً با زمان نشست مشاهده‌شده در پاسخ مستقیم ولتاژ یا توان یکسان نیست، زیرا پاسخ واقعی سیستم معمولاً از ترکیب چندین مود تشکیل می‌شود و سهم هر مود در متغیر خروجی می‌تواند متفاوت باشد. ازاین‌رو، برای ارزیابی دقیق عملکرد سیستم، بهتر است زمان نشست هم از تحلیل مودال و هم از پاسخ‌های حوزه زمان استخراج شود. STATCOM مناسب باید به‌گونه‌ای عمل کند که علاوه بر کاهش افت اولیه ولتاژ، از ادامه‌دار شدن نوسانات پس از رفع خطا نیز جلوگیری کند.

فرکانس طبیعی مودها نیز در تحلیل پایداری نوسانی اهمیت زیادی دارد، زیرا مشخص می‌کند هر مود با چه نرخ نوسانی در سیستم ظاهر می‌شود. در سیستم‌های قدرت، برخی مودها ماهیت الکترومکانیکی محلی دارند و برخی دیگر به‌صورت بین‌ناحیه‌ای بروز می‌کنند؛ علاوه بر این، در شبکه‌هایی که تجهیزات مبتنی بر مبدل حضور دارند، مودهای کنترلی سریع‌تری نیز ممکن است در فرکانس‌های بالاتر دیده شوند. هدف اصلی STATCOM معمولاً تغییر اساسی در فرکانس طبیعی مودها نیست، بلکه افزایش بخش میراکننده پاسخ و بهبود رفتار نوسانی سیستم است. با وجود این، تنظیم حلقه‌های کنترلی، تغییر شرایط بهره‌برداری و تغییر استحکام الکتریکی باس می‌تواند مکان مودها را جابه‌جا کرده و در نتیجه، فرکانس آن‌ها را نیز تا حدی تغییر دهد. همچنین، نزدیک شدن فرکانس برخی مودهای کنترلی و شبکه‌ای به یکدیگر ممکن است موجب برهم‌کنش نامطلوب و کاهش میرایی شود؛ بنابراین، تحلیل فرکانسی مودها باید در نقاط کار مختلف با دقت انجام شود.

دامنه نوسانات گذرا نیز شاخصی مهم برای ارزیابی کیفیت پاسخ واقعی سیستم در حوزه زمان است و نشان می‌دهد که یک متغیر مانند ولتاژ باس، توان اکتیو خط یا توان راکتیو STATCOM پس از وقوع اختلال، چه میزان نوسان را تجربه می‌کند. البته کاهش دامنه اولیه نوسان به‌تنهایی به معنای بهبود کامل پایداری دینامیکی نیست؛ زیرا ممکن است تجهیز، افت اولیه را محدود کند اما در ادامه، نوساناتی کم‌دامنه و طولانی‌مدت در سیستم باقی بماند. به همین سبب، در ارزیابی پاسخ گذرا باید دامنه اولین قله، نسبت دامنه قله‌های متوالی، نرخ کاهش پوش نوسان و زمان نشست به‌صورت هم‌زمان بررسی شوند. از سوی دیگر، افت تدریجی دامنه قله‌ها در طول زمان می‌تواند مبنایی برای تخمین میرایی از پاسخ زمانی باشد و از این منظر، تحلیل حوزه زمان مکملی مهم برای تحلیل مودال به شمار می‌آید. در مجموع، ارزیابی هم‌زمان ضریب میرایی، زمان نشست، فرکانس مودها و دامنه نوسانات، دیدی جامع و قابل‌اعتماد از کیفیت عملکرد STATCOM در بهبود پایداری نوسانی و دینامیکی سیستم قدرت فراهم می‌کند [۶۰].

در شبکه‌های ضعیف، حتی تغییر اندک در جریان راکتیو می‌تواند نوسان محسوسی در ولتاژ نقطه اتصال ایجاد کند. STATCOM با تشخیص سریع انحراف ولتاژ و اصلاح بلافاصله مؤلفه راکتیو جریان، از گسترش افت ولتاژ جلوگیری می‌کند و دامنه نوسانات را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. این عملکرد، بازیابی بارهای حساس و موتورهای القایی را تسهیل کرده و احتمال بروز ناپایداری ناشی از افزایش تقاضای توان راکتیو پس از رفع خطا را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. با این حال، باید توجه داشت که نسبت اتصال کوتاه پایین در شبکه‌های ضعیف، پایداری حلقه‌های کنترلی خود STATCOM را نیز تحت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا دینامیک حلقه قفل فاز، تأخیرهای ناشی از اندازه‌گیری، محدودکننده جریان، نحوه اولویت‌بندی میان جریان اکتیو و راکتیو و نیز کنترل ولتاژ لینک DC، همگی می‌توانند مودهای دینامیکی جدیدی را در سیستم به وجود آورند [۶۱،۶۲].

از این‌رو، ارزیابی معتبر اثر STATCOM در چنین شبکه‌هایی صرفاً با مقایسه منحنی‌های ولتاژ امکان‌پذیر نیست و مستلزم بررسی جامع چندین جنبه تکمیلی است. نخست آنکه مکان مقادیر ویژه و ضریب میرایی مودهای بحرانی باید مشخص شود تا میزان پایداری نوسانی هر مود به‌دقت سنجیده گردد. همچنین عوامل مشارکت حالت‌های مختلف شبکه و کنترل‌کننده در هر مود باید شناسایی شوند تا معلوم شود کدام بخش از سیستم نقش غالب را در بروز هر نوسان ایفا می‌کند. حساسیت مودها نسبت به بهره‌های کنترلی STATCOM نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که تغییر این بهره‌ها می‌تواند مکان مودها را در صفحه مختلط جابه‌جا کرده و پایداری را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد. افزون بر این، پاسخ زمانی ولتاژ، توان و جریان مبدل باید در کنار عملکرد محدودکننده جریان در شرایط خطای شدید بررسی شود تا رفتار تجهیز در بدترین سناریوهای بهره‌برداری روشن گردد. تغییرات پایداری در نقاط کار مختلف، توپولوژی‌های گوناگون شبکه و سطوح متفاوت اتصال کوتاه نیز باید مورد تحلیل قرار گیرد، زیرا شبکه‌های ضعیف نسبت به تغییر شرایط بهره‌برداری بسیار حساس‌اند. در نهایت، در صورت بهره‌گیری از سیگنال‌های دوربرد برای پایدارساز نوسان توان، تأخیرهای مخابراتی ناشی از انتقال این سیگنال‌ها نیز باید در ارزیابی لحاظ شود، چرا که این تأخیرها می‌توانند بر رفتار مودهای کنترلی اثر بگذارند [۶۳].

در مجموع، عملکرد دینامیکی مطلوب STATCOM زمانی حاصل می‌شود که مودهای بحرانی به سمت بخش چپ‌تر صفحه مختلط منتقل شوند، ضریب میرایی افزایش یابد، زمان نشست کاهش پیدا کند و دامنه نوسانات ولتاژ و توان بدون ایجاد اشباع طولانی‌مدت یا ظهور مودهای کنترلی جدید محدود شود. بنابراین، قضاوت درست درباره تأثیر STATCOM در شبکه‌های ضعیف باید بر پایه ترکیبی از تحلیل مقادیر ویژه، عوامل مشارکت، پاسخ فرکانسی و شبیه‌سازی حوزه زمان انجام گیرد و نمی‌توان آن را صرفاً به بهبود یک شاخص منفرد تقلیل داد.

جدول (۳) مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی پایداری دینامیکی سیستم مجهز به STATCOM را ارائه می‌کند. این شاخص‌ها عملکرد سیستم را از جنبه‌های مختلف، شامل سرعت بازیابی ولتاژ، میزان انحراف از مقدار مرجع، دامنه نوسانات، کیفیت میرایی مودهای دینامیکی و میزان استفاده از ظرفیت مبدل، ارزیابی می‌کنند. استفاده هم‌زمان از این معیارها امکان بررسی جامع اثر STATCOM بر کاهش نوسانات، بهبود پاسخ گذرا و افزایش حاشیه پایداری سیستم را فراهم می‌سازد.

جدول (۴) نشان می‌دهد که کنترل پایه ولتاژ STATCOM عمدتاً برای تثبیت ولتاژ و تأمین توان راکتیو سریع طراحی می‌شود و ممکن است به‌طور غیرمستقیم میرایی برخی مودها را نیز بهبود دهد. بااین‌حال، برای کنترل هدفمند نوسانات محلی یا بین‌ناحیه‌ای، افزودن کنترل‌کننده POD مؤثرتر است. این کنترل‌کننده باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که در فرکانس مود بحرانی، جبران فاز و بهره کافی ایجاد کند و در عین حال، نوسانات فرکانس بالا، نویز اندازه‌گیری و تغییرات ماندگار سیگنال ورودی را تقویت نکند.

۴-۴- شاخص‌های کیفیت توان

کیفیت توان یکی از مؤلفه‌های مهم در ارزیابی عملکرد شبکه‌های قدرت مجهز به STATCOM است. کیفیت توان به میزان مناسب‌بودن مشخصه‌های ولتاژ، جریان و فرکانس برای عملکرد ایمن، پایدار و مطلوب تجهیزات الکتریکی اشاره دارد. در شبکه‌های مدرن، افزایش استفاده از بارهای غیرخطی، کوره‌های قوس الکتریکی[۱۲]، تجهیزات جوشکاری، درایوهای سرعت متغیر، نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی، موجب افزایش نوسانات ولتاژ، هارمونیک‌ها، نامتعادلی فازها و تغییرات سریع توان شده است. این پدیده‌ها می‌توانند موجب کاهش عمر تجهیزات، افزایش تلفات، عملکرد نادرست سامانه‌های حفاظتی و کاهش قابلیت اطمینان شبکه شوند. ازاین‌رو، ارزیابی عملکرد STATCOM باید علاوه بر پایداری ولتاژ و پاسخ گذرا، بر اساس شاخص‌های کیفیت توان نیز انجام شود [۶۴،۶۵].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

Table 3. Main indicators for evaluating the dynamic stability of a system equipped with a static synchronous compensator

جدول (۳): شاخص‌های اصلی ارزیابی پایداری دینامیکی سیستم مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

شاخص	تفسیر فیزیکی	وضعیت نامطلوب	اثر مورد انتظار جبران‌ساز سنکرون استاتیکی
مقدار ویژه مُد	مکان مُد نوسانی در صفحه مختلط را مشخص می‌کند. بخش حقیقی نرخ رشد یا زوال و بخش موهومی فرکانس نوسان را نشان می‌دهد.	قسمت حقیق مثبت بیانگری ناپایداری و قسمت حقیقی تقریباً صفر نشان-دهنده میرایی ضعیف	انتقال مودهای بحرانی به نیم‌صفحه چپ، در صورت طراحی مناسب کنترل‌کننده
ضریب میرایی	سرعت کاهش دامنه نوسانات هر مُد را نسبت به فرکانس طبیعی آن بیان می‌کند.	ضریب میرایی کوچک یا منفی و باقی‌ماندن نوسانات برای مدت طولانی	افزایش ضریب میرایی و کاهش نوسانات ولتاژ و توان
فرکانس طبیعی مود	فرکانس ذاتی مُد را با درنظرگرفتن بخش حقیقی و موهومی مقدار ویژه نشان می‌دهد.	قرارگرفتن مُد در محدوده فرکانسی حساس یا هم‌پوشانی مُدهای کنترل و شبکه	اصلاح محدود فرکانس مُد و جلوگیری از برهم‌کنش نامطلوب کنترل‌کننده‌ها
فرکانس میرا	سرعت نوسان سیستم در حالی‌که دامنه آن به‌تدریج کاهش می‌یابد.	۹۰ درجه	فرکانس نوسان مشاهده‌شده در پاسخ زمانی را مشخص می‌کند.
زمان نشست مُد	زمان لازم برای فروکش‌کردن نوسان مود و ماندن آن در محدوده مجاز.	برای معیار ۲ درصد	زمان تقریبی لازم برای کاهش پاسخ مود به باند مجاز اطراف مقدار نهایی است.
دامنه نوسانات گذرا	شدت تغییرات یک متغیر مانند ولتاژ، توان خط یا توان راکتیو را نشان می‌دهد.	دامنه زیاد، بیش‌جهش شدید یا نوسانات تکرارشونده	محدودکردن دامنه نوسان از طریق کنترل سریع توان راکتیو
نرخ زوال نوسان	سرعت کاهش پوش نمایی نوسان را بیان می‌کند.	کمتر یا برابر صفر و یا مقدار مثبت بسیار کوچک	افزایش نرخ زوال و تسریع حذف نوسانات
نسبت دامنه‌های متوالی	کاهش دامنه میان دو قله متوالی را در پاسخ زمانی اندازه‌گیری می‌کند.	کوچکتر یا برابر صفر یا نزدیک صفر	افزایش افت لگاریتمی و کاهش سریع‌تر قله‌های متوالی
شاخص مشارکت مُد	میزان مشارکت متغیر یا حالتی را در مُد دیگری مشخص می‌کند.	مشارکت زیاد حالت‌های ولتاژ یا کنترل جبران‌ساز در مُد کم‌میرایی	شناسایی سیگنال مناسب برای کنترل‌کننده مکمل و محل مؤثر نصب جبران‌ساز
انتگرال خطای دینامیکی	خطای لحظه‌ای متغیر نسبت به مقدار مرجع یا مطلوب آن.	یک بازه زمانی بسیار کوچک	اندازه تجمعی انحراف متغیر از مقدار مرجع در دوره گذرا

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با کنترل سریع جریان‌های اکتیو و راکتیو و قابلیت تولید مؤلفه‌های کنترلی مناسب، می‌تواند اثر بسیاری از اغتشاشات کیفیت توان را در نقطه اتصال مشترک کاهش دهد. عملکرد این تجهیز معمولاً از طریق اندازه‌گیری لحظه‌ای ولتاژ و جریان، استخراج مؤلفه‌های اصلی و مزاحم، و تولید فرمان مناسب برای مبدل انجام می‌شود. در این فرایند، کنترل‌کننده STATCOM تلاش می‌کند ولتاژ باس را به مقدار مرجع نزدیک نگه دارد، نوسانات سریع را محدود کند، جریان‌های هارمونیکی را کاهش دهد و توزیع جریان میان فازها را متعادل سازد. فلیکر ولتاژ به نوسانات سریع و تکرارشونده دامنه ولتاژ اطلاق می‌شود که در اثر تغییرات متناوب توان مصرفی بارهای متغیر نظیر کوره‌های قوس الکتریکی، ماشین‌های جوشکاری، آسیاب‌های صنعتی و کمپرسورها رخ می‌دهد. اگرچه این پدیده لزوماً به فروپاشی ولتاژ نمی‌انجامد، اما علاوه بر برهم‌زدن آسایش بصری مصرف‌کنندگان، عملکرد تجهیزات حساس را مختل ساخته و با تحریک نوسانات در حلقه‌های کنترلی منابع تولید پراکنده، کیفیت توان شبکه را کاهش می‌دهد [۶۶،۶۷]. جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با پایش مداوم ولتاژ و تزریق یا جذب بلادرنگ توان راکتیو، نوسانات ناشی از این تغییرات ناگهانی بار را در نقطه اتصال مشترک مهار کرده و دامنه تغییرات ولتاژ را محدود می‌سازد. البته اثربخشی این تجهیز در مهار فلیکر مستقیماً به سرعت پاسخ کنترل‌کننده، ظرفیت جریانی مبدل، مشخصات دینامیکی بار و نزدیکی محل نصب به منبع اغتشاش وابسته است؛ چرا که فراتر رفتن دامنه تغییرات بار از ظرفیت نامی تجهیز، موجب ورود مبدل به ناحیه محدودیت جریان و کاهش توانایی آن در تعدیل کامل فلیکر می‌شود، امری که

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

ضرورت در نظر گرفتن هم‌زمان مقادیر میانگین و نرخ تغییرات سریع توان راکتیو را در طراحی تجهیز دوچندان می‌سازد [۶۸،۶۹].

Table 4. Qualitative comparison of dynamic stability in different compensation modes

جدول (۴): مقایسه کیفی پایداری دینامیکی در حالت‌های مختلف جبران‌سازی

معیار	بدون جبران‌ساز دینامیکی	جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با کنترل ولتاژ پایه	جبران‌ساز سنکرون استاتیکی مجهز به کنترل‌کننده مکمل
افت اولیه ولتاژ	عمیق‌تر	محدودتر	محدودتر
ضریب میرایی مود بحرانی	معمولاً پایین‌تر	ممکن است بهبود یابد	معمولاً بیشترین بهبود در صورت تنظیم صحیح
زمان نشست	طولانی‌تر	کوتاه‌تر	کوتاه‌تر و با نوسانات باقی‌مانده کمتر
دامنه نوسان ولتاژ	زیاد	کاهش‌یافته	کاهش‌یافته و میراشونده‌تر
دامنه نوسان توان خطوط	ممکن است زیاد باشد	بهبود وابسته به محل نصب و کنترل	کاهش مؤثرتر با انتخاب سیگنال ورودی مناسب
کنترل مودهای بین‌ناحیه‌ای	محدود	اثر غیرمستقیم و گاهی ناکافی	اثر مستقیم‌تر از طریق جبران فاز مناسب
حساسیت به تنظیم ضرایب	ندارد	متوسط تا زیاد	زیاد؛ تنظیم نامناسب می‌تواند میرایی را کاهش دهد
نیاز به سیگنال اندازه‌گیری اضافی	ندارد	معمولاً کم	نیازمند سیگنال محلی یا دوردست مناسب
پیچیدگی کنترل	کم	متوسط	زیاد
عملکرد در شبکه ضعیف	احتمال نوسان و افت ولتاژ بیشتر	پشتیبانی سریع ولتاژ	پشتیبانی ولتاژ همراه با میرایی هدفمند نوسانات
خطر برهم‌کنش کنترلی	پایین‌تر، ولی فاقد کنترل سریع	موجود	بیشتر و نیازمند تحلیل مودال و فرکانسی دقیق
معیار اصلی طراحی	حفظ پایداری ذاتی شبکه	تنظیم ولتاژ و محدودیت جریان	بیشینه‌سازی میرایی با رعایت قیود مبدل

اعوجاج هارمونیکی کل نیز از پیامدهای اجتناب‌ناپذیر گسترش بارهای غیرخطی و مبدل‌های الکترونیک قدرت در شبکه است که با کشیدن جریان‌های غیرسینوسی و عبور آن‌ها از امپدانس سیستم، اعوجاج ولتاژ در باس اتصال را رقم می‌زند. پیامد این پدیده شامل افزایش تلفات، گرمایش غیرمجاز کابل‌ها و ترانسفورماتورها، ایجاد جریان اضافی در هادی نول، تشدید پدیده‌های تشدید و عملکرد نادرست رله‌های حفاظتی است [۷۰،۷۱]. با پیاده‌سازی راهبردهای کنترلی پیشرفته، STATCOM می‌تواند علاوه بر تنظیم ولتاژ بنیادین، عملکرد یک فیلتر فعال قدرت را نیز ایفا کند؛ به این صورت که با استخراج مؤلفه‌های هارمونیکی و تزریق جریان‌های جبران‌ساز با فاز و دامنه متناسب، اعوجاجات موجود در نقطه اتصال را خنثی ساخته و شکل موج را به حالت سینوسی نزدیک می‌گرداند. قابلیت تجهیز در این زمینه به عواملی چون فرکانس کلیدزنی، ساختار فیلترهای خروجی، پهنای باند کنترل و دقت الگوریتم‌های هارمونیک‌گیری بستگی دارد؛ بنابراین برقراری مصالحه بهینه میان کیفیت پالایش هارمونیکی، تلفات کلیدزنی، الزامات سیستم خنک‌کننده و هزینه‌های اجرایی از ضروریات طراحی این بخش به شمار می‌رود.

نامتعادلی ولتاژ که در پی عدم تقارن در دامنه یا زاویه فاز ولتاژهای سه‌فاز به دلیل توزیع نامتوازن بارها، حضور مصرف‌کننده‌های تک‌فاز پرمصرف یا خطاهای نامتقارن شبکه پدید می‌آید، عامل بروز گشتاورهای نوسانی، اضافه جریان و تنش حرارتی شدید در موتورهای القایی و نیز افزایش ریپل ولتاژ لینک DC در مبدل‌های قدرت است [۷۲،۷۳]. STATCOM از طریق کنترل تفکیک‌شده و نامتقارن مؤلفه‌های جریان در فازهای سه‌گانه، پایش دقیق مؤلفه‌های توالی منفی و صفر، و تزریق هدفمند جریان‌های جبرانی، شرایط ولتاژ را متعادل می‌سازد و در مقایسه با جبران‌سازهای سنتی عملکرد بسیار منعطفی از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

خود نشان می‌دهد. با این حال، چنانچه عدم تعادل شبکه ناشی از خطاهای شدید یا بارهای تک‌فاز بسیار بزرگ باشد، تقاضای جریان جبران‌ساز ممکن است از ظرفیت مجاز مبدل فراتر رود؛ وضعیتی که مستلزم تعریف اولویت‌بندی دقیق در الگوریتم کنترل میان تثبیت دامنه ولتاژ، حذف توالی منفی و اعمال حدود جریانی برای جلوگیری از اضافه بار کلیدها در شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌ها است.

تغییرات ناگهانی توان اکتیو و راکتیو، ناشی از کلیدزنی بارهای عمده، نوسانات تصادفی مزارع بادی و خورشیدی، راه‌اندازی موتورهای بزرگ یا حوادث گذرا در خطوط، تنش‌های دینامیکی شدیدی را بر شبکه تحمیل می‌کند که این چالش در شبکه‌های ضعیف با امپدانس معادل بالا به صورت افت یا جهش‌های چشمگیر ولتاژ نمایان می‌شود [۷۴،۷۵]. جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با تکیه بر سرعت پاسخ‌دهی بالای خود، پیش از آنکه نوسانات ناگهانی توان موجب انحراف شدید پروفیل ولتاژ از محدوده مجاز شود، با سوییچ سریع میان مدهای تزریق و جذب توان راکتیو، شیب تغییرات ولتاژ را ملایم کرده و انحرافات گذرا را مهار می‌سازد. این کنش سریع دینامیکی نه تنها دامنه بیش‌جهش و کم‌جهش‌های ولتاژ را به حداقل می‌رساند، بلکه زمان نشست سیستم را به میزان چشمگیری کاهش داده و شرایط بازگشت سریع شبکه به نقطه تعادل پایدار را پس از وقوع تغییرات ناگهانی بار و تولید فراهم می‌آورد [۷۶،۷۷].

همان‌گونه که جدول نشان می‌دهد، مزیت اصلی STATCOM در حوزه کیفیت توان، ترکیب سرعت پاسخ بالا، قابلیت کنترل پیوسته و امکان جبران مؤلفه‌های نامتقارن و هارمونیکی است. با این حال، دستیابی به این قابلیت‌ها مستلزم طراحی دقیق حلقه‌های کنترل، استفاده از فیلترهای خروجی مناسب و مدیریت صحیح ظرفیت جریان مبدل است؛ زیرا در شرایطی که تقاضای هم‌زمان برای جبران ولتاژ، هارمونیک و نامتعادلی وجود داشته باشد، محدودیت جریان مبدل ممکن است به یک عامل مقیدکننده تبدیل شود [۷۸،۷۹].

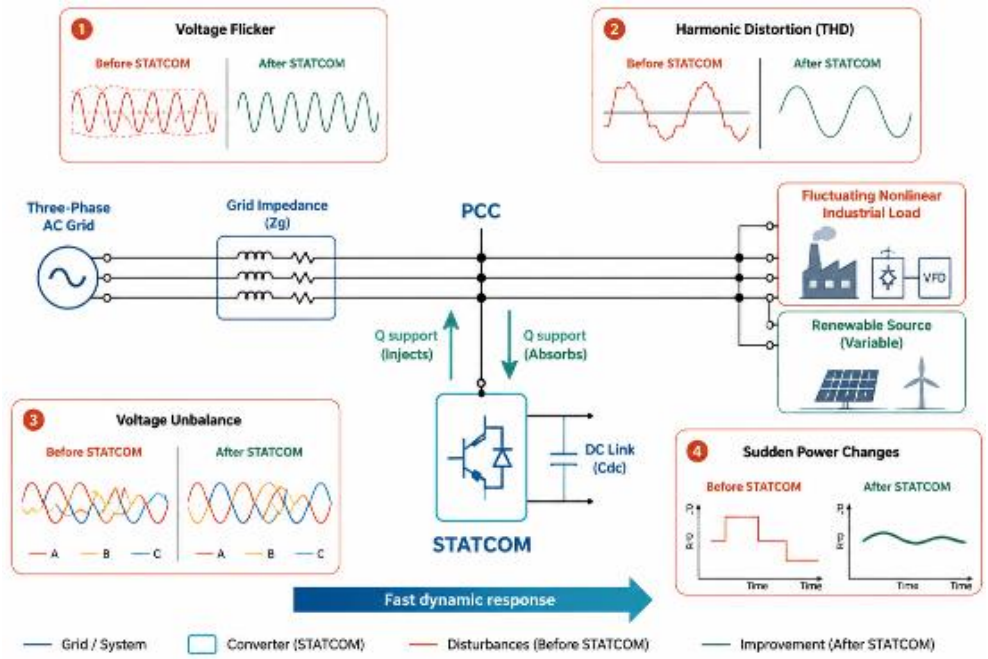
شکل (۶) نشان می‌دهد که STATCOM به‌صورت موازی در نقطه اتصال مشترک به شبکه متصل شده و با پاسخ سریع الکترونیکی، جریان راکتیو موردنیاز را تزریق یا جذب می‌کند. در نتیجه، نوسانات دامنه ولتاژ ناشی از فلیکر کاهش یافته، شکل‌موج ولتاژ و جریان به حالت سینوسی نزدیک‌تر می‌شود، عدم‌تعادل میان فازها بهبود می‌یابد و تغییرات ناگهانی توان با سرعت بیشتری تعدیل می‌گردد. بنابراین، STATCOM علاوه بر تنظیم ولتاژ، به‌عنوان یک تجهیز چندمنظوره برای ارتقای کیفیت توان در شبکه‌های دارای بارهای نوسان‌زا، بارهای غیرخطی و منابع تجدیدپذیر نیز عمل می‌کند.

Table 5. Qualitative comparison of the effect of different compensation methods on power quality indicators

جدول (۵): مقایسه کیفی اثر روش‌های مختلف جبران‌سازی بر شاخص‌های کیفیت توان

تجهیزات جبران‌سازی / معیار مقایسه	بدون جبران‌سازی	بانک خازنی/راکتور	جبران‌ساز وار استاتیکی	جبران‌ساز سنکرون استاتیکی
فلیکر ولتاژ	زیاد	بهبود محدود	بهبود متوسط	بهبود قابل‌توجه
اعوجاج هارمونیکی	وابسته به بار	بدون اثر کاهشی محسوس	بدون اثر کاهشی محسوس	قابل کاهش در حالت فیلترینگ فعال
نامتعادلی ولتاژ	وابسته به بار و شبکه	جبران متقارن و محدود	جبران متقارن و محدود	امکان جبران مستقل فازها
تغییرات ناگهانی توان	افت و نوسان شدید ولتاژ	پاسخ کند و گسسته	پاسخ نسبتاً سریع	پاسخ بسیار سریع و پیوسته
عمق افت ولتاژ گذرا	زیاد	تأثیر محدود در ولتاژ پایین	بهبود متوسط	بهبود قابل‌توجه
سرعت پاسخ به اغتشاش	بدون پاسخ	بسیار کند (کلیدزنی مکانیکی)	در حد چند ده میلی‌ثانیه	در حد چند میلی‌ثانیه
قابلیت کنترل دامنه و فاز به‌طور مستقل	ندار	محدود	محدود	کامل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026



شکل (۶): نمایش مفهومی نقش جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در بهبود شاخص‌های کیفیت توان شامل کاهش فلیکر ولتاژ، کاهش اعوجاج هارمونیکی کل، جبران نامتعادلی ولتاژ و تعدیل تغییرات ناگهانی توان در نقطه اتصال مشترک.

Figure 6. Conceptual representation of the role of static synchronous compensator in improving power quality indicators, including voltage flicker reduction, total harmonic distortion reduction, voltage unbalance compensation, and modulation of sudden power changes at the common connection point.

به‌طور خلاصه، STATCOM نه‌تنها در تنظیم ولتاژ حالت ماندگار و بهبود پایداری گذرا مؤثر است، بلکه به دلیل پاسخ دینامیکی سریع و ساختار کنترلی انعطاف‌پذیر، ابزار مؤثری برای بهبود مجموعه‌ای از شاخص‌های کیفیت توان شامل فلیکر، اعوجاج هارمونیکی، نامتعادلی ولتاژ و نوسانات ناگهانی توان به شمار می‌رود.

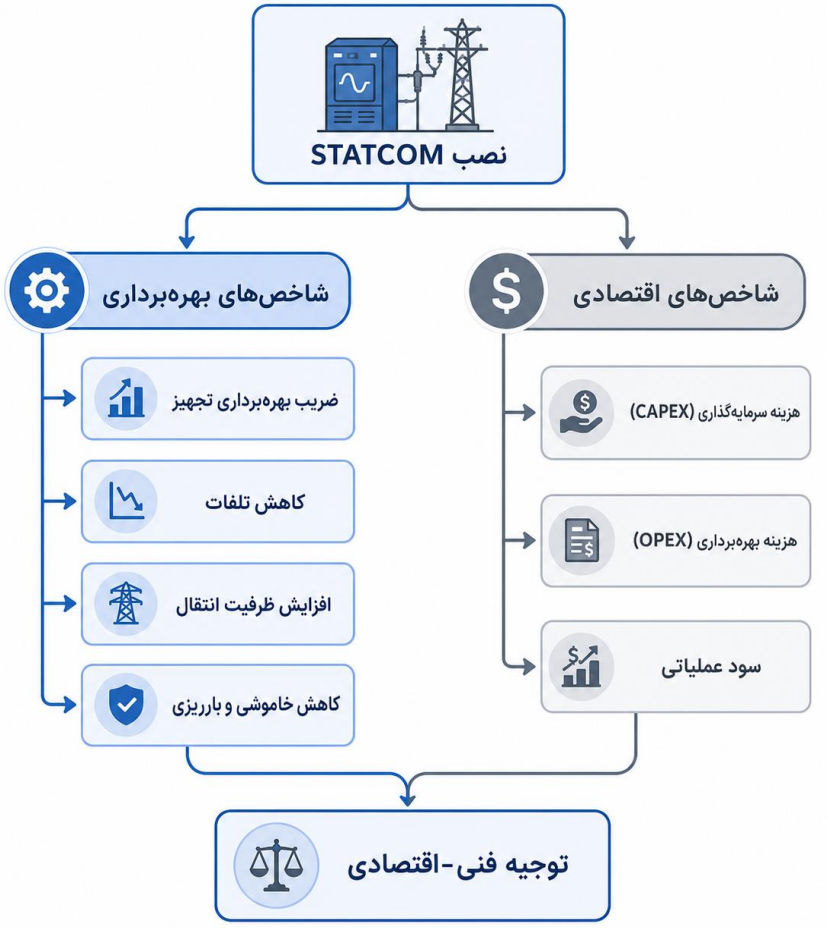
جدول (۵) مقایسه‌ای زیر، نقش STATCOM را در بهبود شاخص‌های اصلی کیفیت توان در مقایسه با سایر روش‌های جبران‌سازی و بدون جبران‌سازی به‌طور کیفی نشان می‌دهد.

۵-۴- شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی

ارزیابی STATCOM نباید تنها بر مبنای بهبود ولتاژ یا کاهش نوسانات گذرا انجام شود؛ زیرا تصمیم برای نصب این تجهیز در شبکه‌های انتقال، فوق‌توزیع و صنعتی، مستلزم اثبات توجیه‌پذیری بهره‌برداری و اقتصادی آن نیز هست. STATCOM یک تجهیز سرمایه‌بر مبتنی بر الکترونیک قدرت است و ارزش واقعی آن زمانی آشکار می‌شود که آثار آن بر افزایش قابلیت بهره‌برداری از شبکه، کاهش هزینه‌های ناشی از محدودیت انتقال، جلوگیری از خاموشی یا بارریزی، کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان به‌صورت هم‌زمان بررسی شود. بنابراین، شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی باید مکمل شاخص‌های ولتاژ، پایداری و کیفیت توان باشند [۸۰،۸۱].

شکل (۷) نشان می‌دهد که نصب STATCOM چگونه از طریق بهبود شاخص‌های بهره‌برداری، مانند افزایش ضریب بهره‌برداری تجهیزات، کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال و کاهش خاموشی یا بارریزی، می‌تواند عملکرد شبکه را ارتقا دهد. در کنار این مزایا، شاخص‌های اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و سود عملیاتی نیز در ارزیابی نهایی نقش دارند. در مجموع، همگرایی این عوامل به توجیه فنی-اقتصادی استفاده از STATCOM منجر می‌شود و نشان می‌دهد که این تجهیز علاوه بر بهبود فنی، می‌تواند از نظر مالی نیز برای شبکه مقرون‌به‌صرفه باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]



شکل (۷): ساختار شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی مرتبط با نصب جبران‌ساز سنکرون استاتیکی و نقش آن در بهبود عملکرد فنی-اقتصادی شبکه قدرت.

Figure (1): Structure of operational and economic indicators related to the installation of static synchronous compensators and its role in improving the technical-economic performance of the power grid.

ضریب بهره‌برداری تجهیز معیاری برای سنجش میزان بهره‌گیری از ظرفیت نامی نصب‌شده در یک بازه بهره‌برداری معین است و نشان می‌دهد که تجهیز در چه کسری از زمان و با چه نسبتی از توان اسمی خود به کار گرفته شده است [۸۲]. برای STATCOM این شاخص اهمیت دوچندان دارد، زیرا الگوی بارگذاری آن به‌طور مستقیم به ویژگی‌های شبکه، تغییرات بار و تولید، شدت اغتشاشات و محل نصب وابسته است. در شبکه‌هایی با نوسان‌های مکرر بار و تولید، این تجهیز در بخش عمده‌ای از ساعات شبانه‌روز در حال تبادل توان راکتیو و تنظیم ولتاژ است و در نتیجه ضریب بهره‌برداری بالایی را تجربه می‌کند؛ حال آنکه در شبکه‌های آرام با حاشیه راکتیو کافی، ممکن است مدت زیادی را در حالت آماده‌به‌کار یا بار سبک سپری کند. ضریب بهره‌برداری مناسب از یک سو گواه انتخاب درست ظرفیت و محل نصب است و از سوی دیگر اثر مستقیمی بر بازگشت سرمایه دارد؛ چرا که انتخاب ظرفیت بیش از نیاز، بخشی از سرمایه را به‌صورت ظرفیت بلااستفاده باقی گذاشته و هزینه نهایی هر واحد توان راکتیو ارائه‌شده را افزایش می‌دهد، در حالی که انتخاب ظرفیتی کمتر از نیاز پیک، تجهیز را در شرایط بحرانی به مرز جریان رسانده و از پشتیبانی کامل باز می‌دارد. از این رو، تحلیل ضریب بهره‌برداری باید در کنار بررسی سناریوهای پیک و شرایط اضطراری انجام شود تا تعادل مناسبی میان هزینه سرمایه‌گذاری و کارایی عملیاتی برقرار گردد.

تلفات توان اکتیو در شبکه‌های انتقال و توزیع هم از مقاومت‌های اهمی خطوط و تجهیزات و هم از عبور جریان‌های راکتیو اضافی ناشی می‌شود. انتقال توان راکتیو از فواصل دور، جریان عبوری خطوط را افزایش می‌دهد و چون تلفات اهمی به‌صورت درجه دوم با جریان رشد می‌کند، پیامد آن افزایش چشمگیر تلفات است. جبران‌سازی راکتیو محلی با STATCOM، با تأمین توان راکتیو در مجاورت نقطه مصرف، از انتقال این توان در طول خطوط جلوگیری کرده و جریان عبوری را کاهش می‌دهد که

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

این امر به کاهش تلفات توان اکتیو و بهبود بازده کلی انتقال می‌انجامد. میزان این کاهش به سطح جبران‌سازی، محل نصب، مقاومت خطوط و الگوی بار وابسته است و در شبکه‌های شعاعی طولانی با بارهای دور از منبع، اثر جبران‌سازی محلی معمولاً قابل‌توجه است. افزون بر این، STATCOM با نگه‌داشتن ولتاژ در محدوده مطلوب از افزایش جریان ناشی از افت ولتاژ نیز جلوگیری می‌کند؛ اما باید در نظر داشت که خود تجهیز به دلیل تلفات کلیدزنی و هدایت نیمه‌هادی‌ها مقداری تلفات داخلی دارد و کاهش خالص تلفات باید پس از کسر این مقادیر محاسبه شود. با وجود این، در کاربردهای متعارف، کاهش تلفات حاصل از جبران‌سازی راکتیو بر تلفات داخلی مبدل غالب است.

ظرفیت انتقال خطوط و ترانسفورماتورها علاوه بر محدودیت‌های حرارتی و مکانیکی، با ملاحظات پایداری ولتاژ نیز مقید می‌شود. در بسیاری از شبکه‌های ضعیف، محدودیت عملی انتقال توان پیش از رسیدن به حد حرارتی، توسط افت ولتاژ و نزدیکی به نقطه فروپاشی ولتاژ تعیین می‌گردد و از همین رو جبران‌سازی راکتیو مناسب با بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش حاشیه پایداری، امکان انتقال توان بیشتری را از طریق زیرساخت موجود فراهم می‌آورد [۸۳]. نصب STATCOM در میانه یا انتهای یک خط انتقال طولانی می‌تواند نقطه کار سیستم را از نقطه بحرانی منحنی مشخصه توان-ولتاژ دور کرده و حاشیه پایداری را افزایش دهد؛ این افزایش حاشیه، امکان بهره‌برداری از خط در سطوح توان بالاتر را بدون نیاز به احداث خطوط جدید میسر می‌سازد. بدین ترتیب، STATCOM به‌عنوان راهکاری اقتصادی برای به‌تأخیر انداختن یا حذف سرمایه‌گذاری‌های سنگین توسعه شبکه انتقال عمل می‌کند؛ مزیتی که به‌ویژه در شبکه‌های مواجه با محدودیت حریم، مشکلات اخذ مجوز یا هزینه‌های بالای احداث خطوط جدید اهمیت چشمگیری می‌یابد.

یکی از مهم‌ترین اثرات اقتصادی نصب STATCOM، بهبود قابلیت اطمینان شبکه و کاهش احتمال خاموشی یا نیاز به بارریزی است [۸۴]. افت‌های شدید ولتاژ، ناپایداری ولتاژ یا فروپاشی آن می‌تواند به خروج واحدهای تولیدی، از دست رفتن بخشی از بار و در شرایط حاد به خاموشی‌های گسترده منجر شود که هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی آن، به‌ویژه برای بارهای صنعتی حساس، فرآیندهای پیوسته تولید، مراکز داده و زیرساخت‌های حیاتی بسیار بالاست. STATCOM با پاسخ سریع خود در هنگام اغتشاش، ولتاژ را در محدوده مجاز نگه داشته و از گسترش افت ولتاژ به سایر بخش‌های شبکه جلوگیری می‌کند؛ این عملکرد احتمال خروج بار و واحدهای تولیدی را کاهش داده و در نتیجه میزان انرژی تأمین‌نشده در طول دوره بهره‌برداری را پایین می‌آورد. در مطالعات قابلیت اطمینان، این اثر از طریق شاخص‌هایی مانند تعداد دفعات قطع، مدت‌زمان قطع و انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار سنجیده می‌شود و بهبود این شاخص‌ها به‌طور مستقیم به کاهش هزینه‌های ناشی از قطع بار و افزایش درآمد بهره‌بردار می‌انجامد و در تحلیل اقتصادی باید به‌صورت سود عملیاتی لحاظ گردد.

تحلیل اقتصادی نصب STATCOM در نهایت بر مقایسه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری با سودهای عملیاتی حاصل از مزایای فنی استوار است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل خرید مبدل، ترانسفورماتور واسط، سیستم خنک‌کننده، فیلترها، تجهیزات حفاظتی، هزینه نصب و راه‌اندازی و هزینه‌های زیرساخت و زمین می‌شود و هزینه‌های بهره‌برداری نیز تلفات داخلی، نگهداری دوره‌ای، تعویض قطعات و در صورت نیاز هزینه‌های نیروی انسانی را در بر می‌گیرد. در طرف مقابل، سودهای عملیاتی از منابع متعددی تأمین می‌شود: کاهش تلفات شبکه، افزایش ظرفیت انتقال و تأخیر در سرمایه‌گذاری توسعه، کاهش هزینه‌های ناشی از قطع بار و خاموشی، کاهش جریمه‌های مرتبط با کیفیت توان و در برخی بازارهای برق، امکان مشارکت در بازار خدمات جانبی و دریافت درآمد از محل ارائه توان راکتیو. برای مقایسه این دو جریان مالی در طول عمر پروژه، معمولاً از شاخص‌های ارزش فعلی خالص، نرخ بازگشت داخلی و دوره بازگشت سرمایه استفاده می‌شود؛ و در مواردی که STATCOM به‌عنوان جایگزین احداث خط جدید یا راهکار رفع محدودیت‌های پایداری برگزیده می‌شود، اختلاف هزینه میان این گزینه‌ها می‌تواند بسیار چشمگیر و به سود STATCOM باشد [۸۵،۸۶].

جدول (۶) اثر STATCOM را بر شاخص‌های اصلی بهره‌برداری و اقتصادی در مقایسه با وضعیت بدون جبران‌سازی و سایر گزینه‌های جبران‌سازی به‌طور کیفی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول برمی‌آید، بانک‌های خازنی و راکتورها به دلیل هزینه پایین، گزینه‌های اقتصادی مناسبی برای جبران‌سازی ثابت و بهبود حالت ماندگار هستند، اما قابلیت پاسخ دینامیکی و پشتیبانی از ولتاژ در شرایط اغتشاش را ندارند. SVC از نظر سرعت پاسخ در جایگاه میانی قرار دارد و در کاربردهای بسیاری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

گزینه متعادلی محسوب می‌شود. STATCOM با وجود هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر، در شبکه‌های ضعیف، باس‌های بحرانی و کاربردهایی که به پاسخ سریع، کنترل دقیق و قابلیت ارائه خدمات جانبی نیاز دارند، از نظر فنی-اقتصادی برتری محسوسی دارد. بنابراین، انتخاب میان این گزینه‌ها باید بر مبنای تحلیل جامعی انجام شود که در آن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، سودهای عملیاتی، الزامات پایداری و ویژگی‌های خاص هر شبکه به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شده باشد. در مجموع، شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی مکمل شاخص‌های فنی و دینامیکی هستند و ارزیابی کامل عملکرد STATCOM بدون توجه به آن‌ها ناقص خواهد بود. توجیه نصب این تجهیز زمانی قوی‌تر می‌شود که مزایای کمی مانند کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال و کاهش خاموشی، در کنار مزایای کیفی مانند بهبود پایداری و کیفیت توان، به‌صورت یک‌پارچه و در چارچوب تحلیل هزینه-فایده در طول عمر پروژه بررسی شوند.

Table 6. Qualitative comparison of the effects of different compensation options on operational and economic indicators

جدول (۶): مقایسه کیفی اثر گزینه‌های مختلف جبران‌سازی بر شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی

تجهیزات جبران-سازی / معیار مقایسه	بدون جبران‌سازی	بانک خازنی/راکتور	جبران‌ساز وار استاتیکی	جبران‌ساز سنکرون استاتیکی
ضریب بهره‌برداری تجهیز	—	بالا در حالت جبران ثابت	متوسط	وابسته به شدت اغتشاشات، با قابلیت پاسخ در همه سطوح
کاهش تلفات شبکه	مبنا	متوسط	متوسط تا خوب	خوب، به‌ویژه با جبران محلی
افزایش ظرفیت انتقال	مبنا	محدود	قابل‌توجه	قابل‌توجه و مؤثر در شبکه ضعیف
کاهش خاموشی و بارریزی	مبنا	تأثیر محدود در افت‌های گذرا	خوب	بسیار خوب در اغتشاشات سریع
سرعت پاسخ به اغتشاش	بدون پاسخ	بسیار کند	نسبتاً سریع	بسیار سریع
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	صفر	کم	متوسط	زیاد
هزینه بهره‌برداری و نگهداری	—	بسیار کم	متوسط	متوسط تا نسبتاً زیاد
قابلیت ارائه خدمات جانبی	ندارد	محدود	محدود	گسترده و انعطاف‌پذیر
دوره بازگشت سرمایه	—	کوتاه	متوسط	بلندتر، ولی با مزایای فنی بیشتر
ارزش در شبکه‌های ضعیف	پایین	محدود	خوب	بسیار بالا

۵- ساختارهای کنترلی و اثر آنها بر شاخص‌ها

عملکرد دینامیکی و حالت ماندگار جبران‌ساز سنکرون استاتیکی پیوند ناگسستنی با معماری کنترلی و نحوه تنظیم پارامترهای آن دارد. وظیفه اصلی ساختار کنترل، تنظیم ولتاژ لینک DC مبدل، پایش و تصحیح ولتاژ شین در نقطه اتصال مشترک، تزریق یا جذب سریع جریان راکتیو در شرایط خطا و میرایی نوسانات فرکانس پایین است. یک ساختار کنترلی ناکارآمد نه تنها مزایای سخت‌افزاری مبدل‌های منبع ولتاژ را بی‌اثر می‌کند، بلکه ممکن است موجب بروز ناپایداری‌های تشدیدی، اشباع مبدل و اضافه جهش‌های ولتاژی در شبکه شود. بر این اساس، رویکردهای گوناگونی از کنترل‌های خطی کلاسیک تا راهبردهای مقاوم، تطبیقی و هوشمند برای ارتقای قابلیت اطمینان و سرعت پاسخ این تجهیز ارائه شده است [۸۷].

۵-۱- کنترل مرسوم تناسبی–انتگرالی

کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI به دلیل سادگی ساختار، قابلیت پیاده‌سازی بی‌درنگ بر روی پردازنده‌های سیگنال دیجیتال و درک فیزیکی ملموس، از متداول‌ترین روش‌ها در درایو و کنترل STATCOM به شمار می‌روند [۸۸،۸۹]. در این رویکرد، یک کنترل‌کننده PI در حلقه بیرونی، خطای میان دامنه ولتاژ شین اندازه‌گیری‌شده و ولتاژ مرجع را پردازش کرده و سیگنال مرجع توان یا جریان راکتیو را تولید می‌کند؛ هم‌زمان، کنترل‌کننده PI دیگری به تثبیت ولتاژ خازن لینک DC حول مقدار نامی اختصاص می‌یابد:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

$$i_{q,ref}(t) = K_{p,v}[V_{ref}(t) - V_{mean}(t)] + k_{i,v}\int_0^t [V_{ref}(\tau) - V_{mean}(\tau)]d\tau \quad (۱۲)$$

با وجود مزایای ذکرشده، بزرگ‌ترین محدودیت ساختار PI عملکرد مبتنی بر خطی‌سازی حول یک نقطه کار نامی است. با وقوع اغتشاشات بزرگ، تغییرات ساختاری در توپولوژی شبکه (نظیر قطع خطوط انتقال) یا تغییرات غیرخطی بارهای موتوری، بهره‌های K_p و K_i دیگر پاسخ بهینه را فراهم نمی‌کنند. در این شرایط، سیستم با رفتارهای نامطلوبی نظیر زمان نشست طولانی، جهش ولتاژی گذرا و حتی تشدید افت ولتاژ به دلیل اشباع انتگرال‌گیر مواجه می‌شود.

۵-۲- کنترل برداری در چارچوب مرجع سنکرون

به‌منظور دستیابی به پاسخ دینامیکی سریع و کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو، روش کنترل برداری در چارچوب مرجع دوّار سنکرون (d-q) استاندارد غالب در سیستم‌های مجهز به STATCOM است. در این روش، با بهره‌گیری از تبدیل پارک و قفل‌کننده فاز، متغیرهای سه‌فاز زمان‌متغیر abc به مقادیر ثابت dc در قاب متعامد dq نگاشته می‌شوند [۹۰،۹۱]. در این پیکربندی با هم‌راستاسازی بردار ولتاژ شبکه بر روی محور d (v_q=0)، جریان محور d (i) مستقیماً تبادل توان اکتیو و ولتاژ لینک DC را تنظیم کرده و جریان محور q (i) تزریق یا جذب توان راکتیو و پایدارسازی ولتاژ AC را به عهده می‌گیرد:

$$\begin{cases} P(t) = \frac{3}{2} v_d(t) i_d(t) \\ Q(t) = -\frac{3}{2} v_d(t) i_q(t) \end{cases} \quad (۱۳)$$

معادلات دیفرانسیل دینامیکی در خروجی فیلتر AC با حضور امپدانس خط نشان‌دهنده یک کوپلینگ متقاطع هستند. برای رفع اثر تداخل متقابل، از حلقه‌های جبران‌ساز جداساز استفاده می‌شود. این تفکیک خطی، امکان طراحی مستقل حلقه‌های سریع کنترل جریان داخلی را فراهم کرده و زمان بازیابی ولتاژ را در خطاهای متقارن به کمتر از چند سیکل کاری می‌رساند. با این حال، در حضور خطاهای شدید نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز به زمین)، مولفه‌های توالی منفی موجب نوسانات فرکانس دو برابر در لینک DC و اعوجاج جریان تزریقی می‌شوند؛ امری که پیاده‌سازی ساختارهای دوگانه در چارچوب توالی مثبت و منفی را گریزناپذیر می‌سازد.

۵-۳- کنترل تطبیقی و مقاوم

وجود عدم‌قطعیت[۱۳] در پارامترهای شبکه قدرت، از جمله تغییرات نسبت اتصال کوتاه، دگرگونی امپدانس خطوط و ترانسفورماتورها و نوسانات نقطه کار، به‌کارگیری رویکردهای کنترل تطبیقی و مقاوم را برای تضمین عملکرد پایدار ضروری می‌سازد. در این راستا، روش کنترل تطبیقی بر پایه مدل مرجع با تنظیم برخط ضرایب کنترلی بر مبنای خطای ردیابی سیگنال، پاسخ گذرای سامانه را پیوسته منطبق بر یک مدل دینامیکی پایدار و مطلوب حفظ می‌کند. همچنین، روش‌های کنترل مقاوم اچ‌بینهایت و سنتز میو با در نظر گرفتن شدیدترین سناریوهای عدم‌قطعیت ساختاری و نامعینی‌های پارامتری، ساختار کنترلی را به‌گونه‌ای شکل می‌دهند که پایداری حلقه‌بسته و اندازه خطای عملکردی همواره در دامنه‌ای امن پایدار بماند؛ افزون بر این، روش کنترل مد لغزشی[۱۴] با تعریف یک سطح لغزش بر پایه خطای ولتاژ و جریان و هدایت متغیرهای حالت به سمت آن، پایداری و مقاومت بسیار بالایی را در مواجهه با اغتشاشات پله‌ای شدید، هارمونیک‌های بار و جهش‌های گذرای ولتاژ ایجاد می‌نماید [۹۲،۹۳].

$$S_q(t) = [i_q(t) - i_{q,ref}(t)) + \lambda_q \int_0^t [i_q(\tau) - i_{q,ref}(\tau)]d\tau \quad (۱۴)$$

مزیت محوری این کنترل‌کننده‌ها، ارتقای حاشیه پایداری، حذف تمایل سیستم به تشدید در شبکه‌های بسیار ضعیف و جلوگیری از واگرایی حلقه‌های تنظیم ولتاژ هنگام تغییرات گسترده بارگذاری است [341-2020]623] [۹۴،۹۵].

۵-۴- کنترل پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی یا بهینه‌سازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

در سال‌های اخیر، به‌کارگیری روش‌های هوش محاسباتی و کنترل بهینه به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های ساختارهای کلاسیک در سیستم‌های قدرت به‌طور چشمگیری گسترش یافته است. در این چارچوب، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر منطق فازی بدون نیاز به مدل دقیق ریاضی و با اتکا به پایگاه قوانین تجربی و متغیرهای زبانی، ضرایب کنترلی را متناسب با دامنه و آهنگ تغییرات خطای ولتاژ به‌صورت بلادرنگ تنظیم می‌کنند. هم‌زمان، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری تقویتی عمیق با آموزش بر پایه داده‌های جامع شبیه‌سازی، امکان تخمین برخط رفتارهای غیرخطی و تعیین خودکار مقادیر مرجع توان راکتیو را بدون ایجاد تأخیر فاز محاسباتی فراهم می‌سازند. افزون بر این، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نظیر ازدحام ذرات، ژنتیک و گرگ خاکستری جایگزین روش‌های سنتی سعی و خطا شده‌اند تا پارامترهای بهینه حلقه‌های کنترل ولتاژ، خازن لینک جریان مستقیم و پایدارسازهای کمکی نوسانات توان را بر مبنای توابع هدف چندمعیاره و با کمینه‌سازی شاخص‌های انتگرالی خطا استخراج نمایند [۹۶،۹۷].

$$J = \int_0^{T_{sim}} t.[\left|V_{pcc}(t) - V_{ref}\right| + \alpha\left|\Delta\omega_{gen}(t)\right| + \beta\left|V_{dc}(t) - V_{dc,ref}\right|]dt \qquad (۱۵)$$

این ترکیب، باعث افزایش کارآمد نسبت میرایی مودهای بین‌ناحیه‌ای، بهبود رفتار ولتاژ در اولین نوسان پس از رفع خطا و کاهش تنش‌های حرارتی المان‌های کلیدزنی مبدل می‌شود.

۵-۵- تحلیل مقایسه‌ای اثر ساختارهای کنترلی بر شاخص‌های بهره‌برداری و پایداری

انتخاب هر یک از معماری‌های کنترلی به‌طور مستقیم بر کیفیت توان، سرعت بازیابی ولتاژ و مقاومت سیستم در برابر نوسانات اثر می‌گذارد. جدول (۷) مقایسه تحلیلی اثرگذاری این روش‌ها را بر شاخص‌های اصلی نشان می‌دهد. در نهایت، یکپارچه‌سازی حلقه‌های کنترلی کمکی مانند میرایی نوسان توان و شبیه‌سازی اینرسی مجازی در لایه‌های فوقانی ساختار کنترل، STATCOM را از یک جبران‌ساز راکتیو صرف، به عنصری کلیدی جهت حفظ پایداری زاویه روتور و پایداری فرکانس در شبکه‌های نوین تجدیدپذیر تبدیل می‌کند.

Table 7. Analytical comparison of the performance of various control structures in systems equipped with static synchronous compensators.

جدول (۷): مقایسه تحلیلی عملکرد ساختارهای گوناگون کنترل در سیستم‌های مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

ساختار کنترلی	سرعت بازیابی ولتاژ	پیش‌جهش ولتاژ	میرایی نوسانات سیگنال کوچک	کیفیت توان و اعوجاج هارمونیکی	پیچیدگی محاسباتی و پیاده‌سازی
PI کلاسیک	متوسط تا کند (وابسته به تنظیم)	متوسط به بالا در اغتشاش شدید	محدود (نیازمند پایدارساز کمکی)	آسیب‌پذیر در برابر تغییر بار	بسیار پایین (استاندارد صنعتی)
برداری دومحوری با تفکیک‌ساز	سریع (چند ده میلی‌ثانیه)	کنترل‌شده و پایین	خوب در مودهای محلی	مناسب در شرایط متعادل	پایین تا متوسط
کنترل مقاوم و مد لغزشی	بسیار سریع	بسیار کم	عالی حتی در شبکه‌های ضعیف	متوسط (احتمال وجود پدیده چترینگ)	متوسط به بالا
منطق فازی و شبکه عصبی	فوق‌العاده سریع	حداقل مقدار ممکن	بسیار مطلوب در انواع اغتشاش	عالی و خودتطبیق	بالا (نیازمند پردازنده قوی)
ترکیبی بهینه‌شده	بهینه و تنظیم‌شده	نزدیک به صفر	حداکثر میرایی برای مودهای بین‌ناحیه‌ای	کاملاً استاندارد	متوسط (طراحی آفلاین، پیاده‌سازی ساده)

۶- روش‌های ارزیابی و شبیه‌سازی

ارزیابی عملکرد دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی نیازمند استفاده هم‌زمان از تحلیل‌های ماندگار، گذرا و سیگنال کوچک است. دلیل این موضوع آن است که STATCOM علاوه بر تنظیم ولتاژ در شرایط عادی بهره‌برداری، در زمان وقوع اغتشاشات نیز با تزریق یا جذب سریع توان راکتیو بر رفتار ولتاژ، جریان، توان انتقالی و نوسانات الکترومکانیکی اثر می‌گذارد. بنابراین، یک چارچوب ارزیابی جامع باید بتواند پاسخ تجهیز را در نقاط کاری متفاوت، سناریوهای خطای گوناگون، تغییرات بار و تولید، و همچنین شرایط مختلف اتصال شبکه بررسی کند [۹۸].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

نرم‌افزار متلب و بخش سامانه‌های الکتریکی آن، محیطی پرکاربرد برای مدل‌سازی اجزا و کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان جبران‌ساز سنکرون استاتیکی هستند. مدل کلیدزنی برای ارزیابی هارمونیک‌ها و کیفیت توان، و مدل میانگین‌گیری‌شده برای شبیه‌سازی سریع‌تر پایداری و حالت‌های گذرای شبکه‌های بزرگ کاربرد دارد. در این ساختار، حلقه کنترل ولتاژ مرجع جریان راکتیو را می‌سازد و حلقه کنترل جریان، ولتاژ فرمان مبدل را مشخص می‌کند [۹۹،۱۰۰].

تحلیل پخش بار نخستین گام برای ارزیابی عملکرد ماندگار سیستم مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی است که در آن ولتاژ شین‌ها، جریان خطوط، تلفات توان و بارگذاری تجهیزات محاسبه می‌شود. این جبران‌ساز در محاسبات به‌صورت یک منبع یا مصرف‌کننده توان راکتیو با محدودیت جریان و ظرفیت نامی مدل شده و هدف اصلی آن حفظ ولتاژ شین در بازه مجاز (معمولاً بین ۰٫۹۵ تا ۱٫۰۵ پریونیت) است؛ مقایسه نتایج قبل و بعد از نصب آن، میزان بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات شبکه و آزادسازی ظرفیت انتقال خطوط را مشخص می‌سازد.

ارزیابی توانمندی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در مواجهه با اغتشاشات شدید، مستلزم شبیه‌سازی خطاهای متقارن (سه‌فاز به‌عنوان بحرانی‌ترین سناریو برای پایداری گذرا و افت ولتاژ) و نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز به‌دلیل احتمال وقوع بیشتر) است. با تعیین دقیق مشخصات خطا نظیر مکان، مقاومت و زمان‌بندی رخداد، اثربخشی تجهیز بر پایه شاخص‌هایی چون کمینه ولتاژ حین خطا، جریان تزریقی، سرعت بازیابی ولتاژ، نوسانات زاویه روتور ژنراتورها و توان راکتیو مبادله‌شده سنجیده می‌شود [۱۰۱،۱۰۲].

شبیه‌سازی حوزه زمان ابزار اصلی برای بررسی رفتار پویای سیستم پس از اغتشاش است که در آن متغیرهایی چون ولتاژ شین‌ها، فرکانس، توان، متغیرهای روتور ماشین‌های سنکرون و خروجی‌های کنترلی STATCOM پایش می‌شوند. این تحلیل توانایی جبران‌ساز را در تحدید افت ولتاژ، افزایش میرایی نوسانات و بازگرداندن سیستم به نقطه کار پایدار مشخص می‌سازد و ارزیابی کمی عملکرد کنترل‌کننده‌ها با معیارهایی نظیر زمان نشست، بیش‌جهش، خطای ماندگار و شاخص‌های انتگرالی خطا انجام می‌پذیرد.

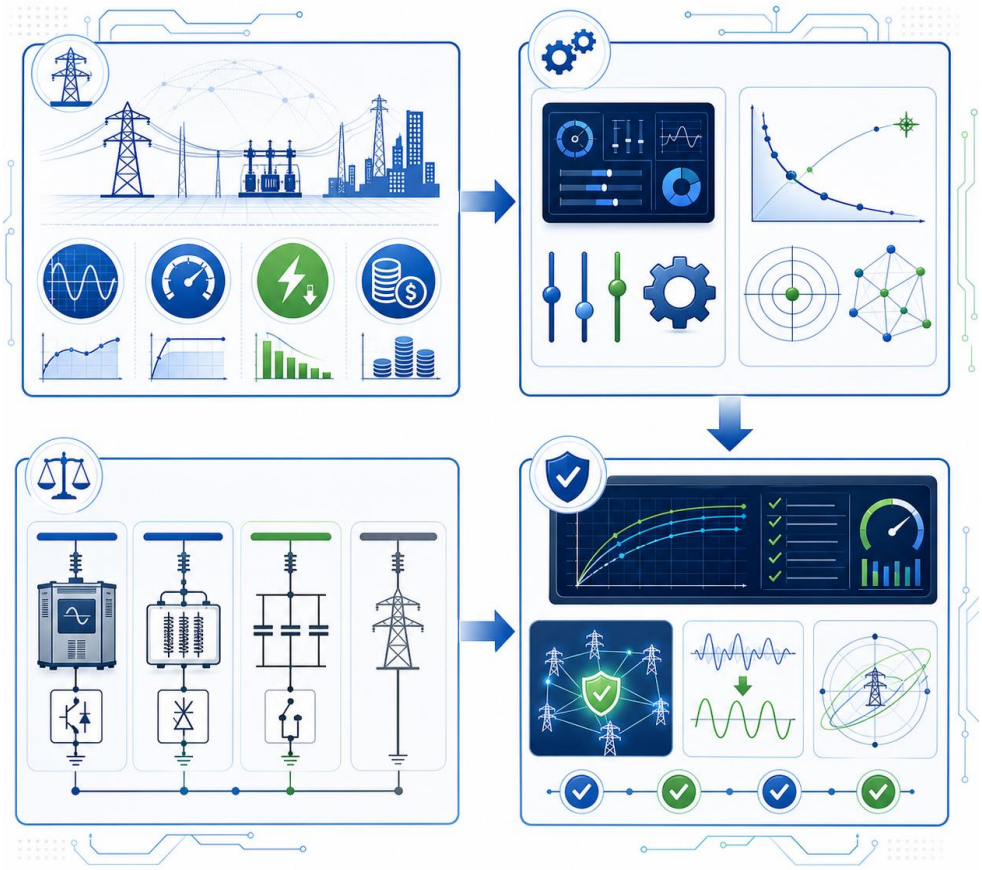
ارزیابی عملکرد STATCOM به‌دلیل تأثیرات چندگانه آن نیازمند رویکردی چندمعیاره است که هم‌زمان شاخص‌های فنی (پروفیل ولتاژ، تلفات، حاشیه پایداری، زمان بازیابی، نسبت میرایی، فلیکر) و اقتصادی (هزینه سرمایه‌گذاری و خاموشی) را پوشش دهد. در این راستا، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای تعیین بهینه مکان، ظرفیت و ضرایب کنترلی به کار می‌روند. در نهایت، برای سنجش دقیق اثربخشی، نتایج در شرایط کاری همسان با سناریوی پایه بدون جبران‌ساز و سایر ادوات (مانند SVC و بانک خازنی) مقایسه می‌شوند تا مزیت نسبی STATCOM در چارچوب یک ارزیابی جامع دینامیکی و چندشاخصی تثبیت گردد.

شکل (۸) چرخه کامل ارزیابی عملکرد STATCOM را در چهار مرحله منطقی به تصویر می‌کشد: ابتدا شاخص‌های ورودی شامل پارامترهای فنی (مانند پروفیل ولتاژ، پایداری و فلیکر) و معیارهای اقتصادی (هزینه سرمایه‌گذاری) جمع‌آوری می‌شوند. در مرحله دوم، از متدهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تعیین دقیق مکان، ظرفیت و ضرایب کنترلی استفاده می‌گردد. در مرحله سوم، شبیه‌سازی‌ها در شرایط کاری یکسان انجام شده و خروجی STATCOM با سناریوهای پایه، SVC و بانک‌های خازنی مقایسه می‌شود. در نهایت، این فرآیند منجر به یک ارزیابی جامع دینامیکی می‌گردد که مزیت نسبی STATCOM را برای تصمیم‌گیرندگان تثبیت می‌کند.

۷- جمع‌بندی تحلیلی

بررسی ادبیات و تحلیل‌های دینامیکی انجام‌شده در سیستم‌های قدرت نشان می‌دهد که جبران‌ساز سنکرون استاتیکی، به‌ویژه در شبکه‌های ضعیف، سامانه‌های دارای سهم بالای منابع تجدیدپذیر، نواحی با بارهای حساس و شبکه‌های انتقال مستعد ناپایداری ولتاژ، یکی از مؤثرترین تجهیزات FACTS برای ارتقای عملکرد بهره‌برداری و پایداری شبکه محسوب می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]



شکل (۸): نمودار مفهومی فرآیند ارزیابی چندمعیاره عملکرد جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در سیستم‌های قدرت با رویکرد بهینه‌سازی جامع.

Figure 8. Conceptual diagram of the multi-criteria evaluation process of static synchronous compensator performance in power systems with a comprehensive optimization approach.

مبنای این اثربخشی، قابلیت تزریق یا جذب سریع توان راکتیو از طریق مبدل منبع ولتاژ و مستقل‌بودن نسبی ظرفیت جریان راکتیو آن از سطح ولتاژ شبکه است. این ویژگی، STATCOM را در مقایسه با جبران‌سازهای مبتنی بر خازن و راکتور سوئیچ‌شونده و نیز SVC، در شرایط افت ولتاژ شدید و اغتشاشات گذرا توانمندتر می‌سازد. یکی از دستاوردهای کلیدی STATCOM، کاهش عمق و مدت افت ولتاژ هنگام اغتشاشات شبکه (مانند خطاها یا تغییرات ناگهانی بار و تولید) است. در غیاب تأمین سریع توان راکتیو، افت ولتاژ می‌تواند زنجیره‌ای تشدید شده و به فروپاشی ولتاژ منجر شود، STATCOM با تزریق سریع جریان راکتیو خازنی مانع از این رخداد شده و بازیابی ولتاژ را تسریع می‌کند. این نقش به‌ویژه در باس‌های انتهایی خطوط بلند، شین‌های صنعتی، مزارع تجدیدپذیر و شبکه‌های دارای بارهای موتوری بالا حیاتی است.

از منظر پاسخ گذرا، STATCOM با تسریع بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا، از تبعات نامطلوب بازیابی کند (نظیر عملکرد ناخواسته حفاظت‌ها، توقف موتورهای القایی، افت تولید تجدیدپذیرها و قطعی بار) جلوگیری می‌کند. تنظیم بهینه کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان آن زمان بازگشت به حالت پایدار را کوتاه می‌سازد؛ از این‌رو، ارزیابی عملکرد دینامیکی تجهیز باید بر شاخص‌هایی چون کمینه ولتاژ گذرا، زمان بازیابی، اضافه‌ولتاژ پس از خطا و انتگرال انحراف ولتاژ مبتنی باشد.

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی افزون بر بهبود پایداری ولتاژ، با استفاده از کنترل‌کننده‌های کمکی مانند POD می‌تواند میرایی نوسانات توان، نوسانات محلی ژنراتورها و تغییرات سریع ولتاژ را افزایش دهد. این تجهیز از طریق تنظیم توان راکتیو، دامنه و زمان ماندگاری مودهای نوسانی بحرانی را کاهش می‌دهد. بااین‌حال، کارایی آن به انتخاب مناسب سیگنال کنترلی، تنظیم بهره‌ها، کاهش تأخیرهای اندازه‌گیری و مخابراتی، و هماهنگی با تجهیزاتی مانند PSS، AVR، VSG و سایر ادوات FACTS وابسته است. جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با پاسخ سریع توان راکتیو، نوسانات ولتاژ، فلیکر و عدم‌تعادل فاز را در بارهای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

متغیر و غیرخطی کاهش داده و کیفیت توان در نقطه اتصال مشترک را بهبود می‌دهد. بااین‌حال، برای کاهش مؤثر هارمونیک‌ها و THD، معمولاً باید از فیلترهای مناسب، کنترل انتخابی هارمونیک یا جبران‌سازهای ترکیبی نیز استفاده شود. همچنین، تزریق کنترل‌شده توان راکتیو توسط STATCOM می‌تواند حاشیه پایداری ولتاژ، ظرفیت انتقال توان و قابلیت بارپذیری شبکه را افزایش دهد؛ این اثر در منحنی‌های P-V و Q-V به‌صورت انتقال نقطه بحرانی به بارگذاری‌های بالاتر ظاهر می‌شود. با وجود این، عملکرد واقعی تجهیز به محدودیت جریان مبدل، ولتاژ لینک DC، اشباع کنترل‌کننده‌ها، قدرت اتصال کوتاه شبکه و ویژگی بارهای وابسته به ولتاژ وابسته است. جمع‌بندی ارزیابی چندشاخصی در جدول (۸) آمده است.

Table 8. Summary of multi-indicator evaluation results

جدول (۸): جمع‌بندی نتایج ارزیابی چندشاخصی

حوزه ارزیابی	اثر اصلی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی	شاخص‌های مناسب ارزیابی	عوامل موثر بر نتیجه
پاسخ ولتاژ گذرا	کاهش عمق افت ولتاژ	منیمم ولتاژ، مدت افت ولتاژ، انتگرال انحراف ولتاژ	محل نصب، ظرفیت جریان، شدت و نوع خطا
بازیابی پس از خطا	کاهش زمان بازگشت ولتاژ	زمان بازیابی، اضافه‌جهش ولتاژ، خطای ماندگار	تنظیم حلقه ولتاژ، محدودیت جریان، مشخصات بار
میرایی نوسانات	کاهش دامنه و زمان نوسان	نسبت میرایی، زمان نشست، دامنه نوسان توان	کنترل‌کننده تکمیلی، هماهنگی با پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم‌کننده ولتاژ، تأخیرها
کیفیت توان	کاهش نوسانات ولتاژ و فلیکر	توان جبران‌ساز، اعوجاج هارمونیکی، عدم‌تعادل ولتاژ	نوع بار، فیلترها، فرکانس کلیدزنی، قدرت اتصال کوتاه
پایداری ولتاژ	افزایش قابلیت بارپذیری و حاشیه امنیت	حاشیه منحنی ولتاژ-توان، حساسیت تغییرات زمانی توان راکتیو	سطح بارگذاری، توپولوژی شبکه، هماهنگی منابع راکتیو

اثربخشی عملیاتی و فنی جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در سیستم‌های قدرت، وابستگی بنیادینی به جانمایی بهینه و ظرفیت‌سنجی دقیق آن در سطح شبکه دارد؛ به‌گونه‌ای که انتخاب باس نامناسب یا اختصاص ظرفیت نامی ناکافی، به اشباع سریع جریان مبدل، کاهش کارایی در کنترل ولتاژ و حتی تداخل نامطلوب با سایر حلقه‌های کنترلی شبکه می‌انجامد، در حالی که ظرفیت‌گذاری مازاد نیز صرفاً افزایش غیرموجه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تلفات بهره‌برداری را به همراه خواهد داشت. از این‌رو، فرآیند مکان‌یابی و تعیین اندازه بهینه این تجهیز باید در قالب یک مطالعه جامع مبتنی بر سناریوهای متنوع بارگذاری، نفوذ منابع تجدیدپذیر، تغییرات سطح توان اتصال کوتاه و قیود اقتصادی انجام گیرد. هم‌راستا با این موضوع، ساختار کنترل STATCOM نقشی محوری در کیفیت پاسخ دینامیکی آن ایفا می‌کند؛ جایی که کنترل‌کننده‌های متداول تناسبی-انتگرالی در مواجهه با عدم‌قطعیت پارامترها، رفتارهای شدیداً غیرخطی شبکه و نفوذ گسترده ادوات مبتنی بر اینورتر با افت عملکرد مواجه می‌شوند. اگرچه به‌کارگیری رویکردهای کنترلی پیشرفته نظیر کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند قابلیت ردیابی، میرایی نوسانات و پایداری را به شکل محسوسی ارتقا دهد، اما همواره باید مصالحه‌ای دقیق میان پیچیدگی الگوریتم، بار پردازشی و امکان‌سنجی پیاده‌سازی بلادرنگ بر روی پردازنده‌های صنعتی برقرار باشد. در نهایت، قضاوت پیرامون عملکرد و طراحی STATCOM نباید به یک معیار منفرد محدود شود، بلکه دستیابی به حداکثر بازده فنی و اقتصادی مستلزم به‌کارگیری یک رویکرد جامع و چندشاخصی است که در آن شاخص‌های پایداری ولتاژ و گذرا، میرایی مودهای نوسانی، معیارهای کیفیت توان، محدودیت‌های حرارتی و جریان تجهیز، قابلیت اطمینان سیستم و هزینه‌های چرخه عمر به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه ارزیابی گردند.

۸- نتیجه‌گیری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی به‌عنوان یک جبران‌ساز سریع و انعطاف‌پذیر، نقش مهمی در ارتقای رفتار دینامیکی سیستم‌های قدرت دارد. در ارزیابی چنین تجهیزی، شاخص‌های بهره‌برداری باید مجموعه‌ای از معیارهای ولتاژی، راکتیو، پایداری، کیفیت توان و اقتصادی را دربرگیرند. رویکرد مناسب آن است که به‌جای تکیه بر یک شاخص، تحلیل چندبعدی انجام شود تا اثر واقعی STATCOM در شرایط عادی و بحرانی آشکار گردد. این موضوع به‌ویژه در شبکه‌های مدرن با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر و بارهای حساس اهمیت بیشتری یافته است.

در این مقاله، تحلیل دینامیکی سیستم‌های قدرت مجهز به جبران‌ساز سنکرون استاتیکی با تمرکز بر شاخص‌های بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفت و تلاش شد تا با رویکردی مروری و ساختاریافته، تصویری یکپارچه از مبانی عملکرد، رفتار دینامیکی و ارزش عملیاتی این تجهیز ارائه شود. مرور انجام‌شده نشان می‌دهد که STATCOM به‌عنوان نسل پیشرفته‌ی جبران‌سازهای راکتیو مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ، در مقایسه با راهکارهای متعارف همچون بانک‌های خازنی و جبران‌ساز استاتیکی تریستوری، از نظر سرعت پاسخ، محدوده‌ی عملکرد مستقل از سطح ولتاژ شبکه و قابلیت کنترل دوطرفه‌ی توان راکتیو، جایگاه ممتازی دارد. جمع‌بندی یافته‌های اصلی این مرور را می‌توان در محورهای زیر تدوین کرد.

۸-۱- جمع‌بندی یافته‌های فنی

از منظر تحلیل پایداری ولتاژ، بررسی منحنی‌های توان–ولتاژ نشان داد که اتصال STATCOM به باس‌های بحرانی، حاشیه پایداری ولتاژ را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد و نقطه فروریزش ولتاژ را به سمت سطوح بار بالاتر جابه‌جا می‌کند. این رفتار ناشی از آن است که STATCOM در محدوده خطی خود به‌صورت یک منبع جریان راکتیو کنترل‌شده عمل می‌کند و برخلاف خازن موازی، توان راکتیو تزریقی آن با کاهش ولتاژ شبکه افت نمی‌کند؛ بلکه تا رسیدن به سقف جریان نامی، جبران‌سازی را حفظ می‌نماید. این ویژگی، STATCOM را به ابزاری مؤثر در مقابله با ناپایداری ولتاژ در شبکه‌های ضعیف و دارای نسبت X/R بالا تبدیل کرده است.

در حوزه پاسخ گذرا، شاخص‌های کمی نظیر زمان نشست، بیشینه فراجهش و انتگرال قدرمطلق خطا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که بهره‌گیری از STATCOM، دامنه نوسانات ولتاژ را پس از اغتشاش‌های ناگهانی (مانند قطع بار، کلیدزنی خط یا اتصال کوتاه) به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و نرخ میرا شدن نوسانات را افزایش می‌دهد. پهنای باند کنترلی بالا و قابلیت تنظیم مستقل دامنه و فاز جریان تزریقی، امکان کنترل هم‌زمان ولتاژ باس و بهبود میرایی نوسانات توان را فراهم می‌آورد؛ قابلیتی که در جبران‌سازهای مبتنی بر سوییچینگ خازن به‌هیچ‌وجه قابل دستیابی نیست.

۸-۲- جمع‌بندی شاخص‌های کیفیت توان

از دیدگاه کیفیت توان، نشان داده شد که STATCOM به دلیل ساختار مبتنی بر مبدل و کنترل مستقل فازها، توانایی عمل به‌عنوان فیلتر فعال و جبران‌ساز نامتعادلی را نیز دارد. این تجهیز قادر است ضمن تنظیم ولتاژ، اعوجاج هارمونیکی، فلیکر ولتاژ و نامتعادلی بین فازها را کاهش دهد؛ هرچند دستیابی هم‌زمان به همه‌ی این اهداف، مستلزم طراحی دقیق حلقه‌های کنترل و لحاظ‌کردن فرکانس کلیدزنی مناسب است. جدول مقایسه‌ای ارائه‌شده در بخش کیفیت توان، برتری کیفی STATCOM را نسبت به SVC و بانک خازنی از حیث سرعت پاسخ و قابلیت کنترل دوطرفه به‌روشنی تأیید کرد.

۸-۳- جمع‌بندی شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی

تحلیل شاخص‌های بهره‌برداری نشان داد که ارزش افزوده STATCOM فراتر از تثبیت ولتاژ است و در پنج محور قابل اندازه‌گیری خلاصه می‌شود: افزایش ضریب بهره‌برداری از زیرساخت‌های موجود، کاهش تلفات توان اکتیو شبکه، افزایش ظرفیت انتقال خطوط، کاهش خاموشی و بارریزی، و در نهایت توجیه‌پذیری اقتصادی از طریق مقایسه‌ی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری با سود عملیاتی. هرچند هزینه اولیه STATCOM به دلیل ساختار مبدل الکترونیک قدرت و سیستم خنک‌کننده، از راهکارهای متعارف بالاتر است، اما در شبکه‌های ضعیف و کاربردهای حساس به کیفیت توان، مجموع سودهای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

ناشی از کاهش تلفات، تعویق سرمایه‌گذاری در احداث خطوط جدید و جلوگیری از خسارات ناشی از خاموشی، می‌تواند دوره‌ی بازگشت سرمایه را به سطح قابل قبولی برساند. این نتیجه‌گیری با منطق تحلیل فنی-اقتصادی ارائه‌شده در بخش ۴-۵ و جدول مقایسه‌ای تجهیزات جبران‌ساز هم‌خوانی دارد.

۴-۸- محدودیت‌ها و افق‌های پژوهش آینده

با وجود مزایای یادشده، بررسی حاضر نشان می‌دهد که به‌کارگیری STATCOM با چالش‌هایی همراه است که شایسته‌ی توجه در مطالعات آینده است. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌ها می‌توان به تلفات داخلی ناشی از کلیدزنی، ضرورت طراحی دقیق فیلترهای سمت AC برای مهار هارمونیک‌های ناشی از مدولاسیون، پیچیدگی الگوریتم‌های کنترل در شرایط اغتشاش شدید و هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه اشاره کرد. همچنین، عملکرد STATCOM در شبکه‌های با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر و ریزشبکه‌ها، موضوعی است که به دلیل ماهیت متغیر و تصادفی این منابع، نیازمند مطالعات تکمیلی و تلفیق با سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی است.

در همین راستا، یکی از مهم‌ترین جهت‌گیری‌های پژوهش آینده، تلفیق STATCOM با ذخیره‌ساز انرژی و شکل‌گیری ساختار موسوم به E-STATCOM است؛ بدین‌صورت که افزودن ظرفیت ذخیره‌سازی به مدار DC این امکان را فراهم می‌آورد که تجهیز علاوه بر توان راکتیو، توان اکتیو نیز مبادله کند و در نتیجه قابلیت تنظیم فرکانس و هموارسازی توان منابع تجدیدپذیر را نیز به‌دست آورد. افزون بر این، توسعه و ارزیابی کنترل‌کننده‌های مقاوم و تطبیقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌کارگیری روش‌های کنترل پیشرفته‌ای نظیر کنترل مد لغزشی، کنترل پیش‌بین و روش‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی می‌تواند عملکرد مطلوب تجهیز را در دامنه وسیعی از شرایط کاری تضمین کند.

از منظر برنامه‌ریزی شبکه نیز، بهینه‌سازی مکان و ظرفیت واحدهای جبران‌ساز یک مسئله‌ی باز و قابل توسعه به شمار می‌رود؛ توسعه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، همچون الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک، برای تعیین هم‌زمان مکان، ظرفیت و تعداد واحدهای STATCOM با هدف کمینه‌سازی تلفات و هزینه‌ها، می‌تواند راهگشای طراحی اقتصادی این تجهیز باشد. در حوزه‌ی تحلیل دینامیکی نیز، توسعه‌ی مدل‌های خطی‌شده‌ی دقیق‌تر برای مطالعات سیگنال کوچک ضروری است تا امکان تحلیل پایداری سیگنال کوچک و طراحی میراگرهای نوسان توان مبتنی بر STATCOM با دقت بیشتری فراهم شود. سرانجام، از دیدگاه اقتصادی، انجام مطالعات هزینه–فایده‌ی جامع در دوره‌ی عمر کامل تجهیز، با لحاظ هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و همچنین ارزش پولی انرژی تأمین‌نشده در سناریوهای مختلف شبکه، برای ارائه‌ی ارزیابی واقع‌بینانه‌تر از توجیه‌پذیری سرمایه‌گذاری توصیه می‌شود.

در مجموع، این مرور نشان می‌دهد که STATCOM به‌عنوان یک عنصر کلیدی در زیرساخت‌های نوین سیستم قدرت، نقشی فراتر از یک جبران‌ساز ساده‌ی توان راکتیو ایفا می‌کند و با تکیه بر قابلیت‌های دینامیکی برجسته‌ی خود، می‌تواند هم‌زمان پایداری ولتاژ، کیفیت توان و شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی شبکه را ارتقا دهد. هم‌گرایی این مزایا، توجیه‌گر گسترش روزافزون کاربرد این فناوری در شبکه‌های انتقال و فوق‌توزیع و همچنین ریزشبکه‌های آینده خواهد بود.

References

مراجع

[1] M. Mahmood, P. Chowdhury, R. Yeassin, M. Hasan, T. Ahmad, N.R. Chowdhury, "Impacts of digitalization on smart grids, renewable energy, and demand response: An updated review of current applications", Energy Conversion and Management: X, vol. 24, Article Number: 100790, Oct. 2024, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100790.

[2] M. Khalid, "Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges", Energy Strategy Reviews, vol. 51, Article Number: 101299, Jan. 2024, https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299.

[3] P.D. Leo, G. Malgaroli, F. Spertino, A. Ciocia, "Renewable energy integration in emerging electricity grids: Technologies, challenges, and system-level perspectives", Applied Sciences, vol. 16, no. 10, Article Number: 5124, May 2026, https://doi.org/10.3390/app16105124.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[4] E. Villa-Ávila, D. Ochoa-Correa, P. Arévalo, "Advancements in power converter technologies for integrated energy storage systems: Optimizing renewable energy storage and grid integration", Processes, vol. 13, no. 6, Article Number: 1819, June 2025, https://doi.org/10.3390/pr13061819.
[5] F. Waskito, F.D. Wijaya, E. Firmansyah, "Review of virtual inertia based on synchronous generator characteristic emulation in renewable energy-dominated power systems", Electricity, vol. 6, no. 4, Article Number: 69, . Dec. 2025, https://doi.org/10.3390/electricity6040069.
[6] A.S. Abdelwahab, I. Vokony, "Beyond synchronization: The evolution of grid-following to grid-forming inverters and the quest for power system stability", Energy Reports, vol. 15, Article number: 109221, June 2026, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109221.
[7] B. Singh, S.S. Murthy, R.R. Chilipi, S. Madishetti, G. Bhuvaneswari, "Static synchronous compensator-variable frequency drive for voltage and frequency control of small-hydro driven self-excited induction generators system", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 8, No. 9, pp. 1528–1538, Sep. 2014, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0703.
[8] F. Shahnia, R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, F. Zare, "Operation and control of a hybrid microgrid containing unbalanced and nonlinear loads", Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 8, pp. 954-965, Aug. 2010, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.01.005.
[9] R.R. Momen, H. Barati, "Location and capacity of UPFC to improve the operation power system using a grasshopper optimisation algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 8, no. 4, pp. 1-16, March 2020, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1398.8.4.1.8.
[10] G. Shahgholian, "A brief overview of microgrid performance improvements using distributed FACTS devices", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 10, no. 1, pp. 43-58, March 2023, https://doi.org/10.30501/jree.2022.321435.1305.
[11] L.N. Gadupudi, G.S. Rao, R. Devarapalli, F.P.G. Márquez, "Seven level voltage source converter based static synchronous compensator with a constant dc-link voltage", Applied Sciences, vol. 11, no. 16, article Number: 7330, Aug. 2021, https://doi.org/10.3390/app11167330.
[12] G. Shahgholian, S. Eshtehardiha, H. Mahdavinasab, M.R. Yousefi, "A novel approach in automatic control based on the genetic algorithm in STATCOM for improvement power system transient stability", Proceeding of the IEEE/ICIS, vol. 1, pp.14-19, Varna, Sep. 2008, https://doi.org/10.1109/IS.2008.4670419.
[13] M. Hussen, T. Rajaram, "A comprehensive review of voltage source converters-based FACTS controllers in hybrid microgrids", IEEE Access, vol. 13, pp. 62961-62999, April 2025, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3557961.
[14] S.M.A. Zanjani, G. Shahgholian, A. Fathollahi, S.M.H. Zanjani, "Coordination design of power system stabilizer and FACTS controllers using nature-inspired metaheuristics optimization algorithms– A brief review", International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 89-106, Dec. 2024, https://doi.org/10.30495/ijsee.2023.1992877.1278.
[15] J. Iqbal, Z. Rashid, G.A. Hussain, S.M.A. Shah, Z.A. Arfeen, "Vector control strategy for improving grid stability using STATCOM and supercapacitor integrated with chopper circuit", Eng., vol. 7, no. 2, article Number: 83, Feb. 2026, https://doi.org/10.3390/eng7020083.
[16] H. Ghaedi, G. Shahgholian, M. Hashemi. "Comparison of the effects of two flatness based control methods for STATCOM on improving stability in power systems including DFIG based wind farms", Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, vol. 8, no. 15, pp. 81-90, 2019, http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0.
[17] M.A. Kamarposhti, I. Colak, P. Thounthong, K. Eguchi, "Modeling and simulation of DVR and D-STATCOM in presence of wind energy system", Computers, Materials and Continua, vol. 74, no. 2, pp. 4547-4570, Oct. 2022, https://doi.org/10.32604/cmc.2023.034082.
[18] S. Fazeli-Nejad, G. Shahgholian, M. Moazzami, "Artificial bee colony algorithm based approach for power system oscillation damping with PSS and STATCOM", International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering, vol. 5, no. 1, pp. 27-39, 2019, https://doi.org/10.20431/2454-9436.0502004.
[19] S. Zhang, Y. Chen, Q. Li, Z. Xie, Y. Fu, W. Wu, "Quantitative stability analysis of STATCOM in voltage control mode and Enhanced control method based on voltage feedforward", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 171, Article Number: 110975, Oct. 2025, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110975.
[20] K. Abojlala, G. Asad, K. Ahmed, D. Holliday, L. Xu, "Generalised dq-dynamic phasor modelling of a STATCOM connected to a grid for stability analysis", IET Power Electronics, vol. 13, no. 4, pp. 720-731, March 2020, https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.6366.
[21] H. Liang, A. Minfu, Y. Zhang, Y. Zhang, S. Zhan, Y. Zhang, Y. Zhang, Z. Tian, "Discrete-time deadbeat control for STATCOMs based on dq reference frame: a high-speed, tuning-free strategy for reactive current

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

regulation", Frontiers in Energy Research, vol. 13, Article Number: 1667565, Oct. 2025, https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1667565.
[22] D.M. Mohammed, R.F. Hassan, N.M. Yasin, M. Alruwaili, M.A. Ibrahim, "A comparative study of direct power control strategies for STATCOM using three-level and five-level diode-clamped inverters", Energies, vol. 18, no. 13, Article Number: 3582, July 2025, https://doi.org/10.3390/en18133582.
[23] M.J. Jalilian, B. Vahidi, S.F. Zarei, G.H. Riahy, "Enhanced current reference generation for PMSG-based wind systems using modified delayed signal cancellation", Energy Reports, vol. 15, Article Number: 109185, June 2026, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109185.
[24] M.L. Srief, B. Soltane, N.A. Lokmane, G. Malak, "A complete control structure based backstepping controller design for stacked multi-cell multi-level SPWM VSC STATCOM", Energy Reports, vol. 12, pp. 687-698, Dec. 2024, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.051.
[25] T.V. Vu, S. Paran, F. Diaz-Franco, T. El-Mezyani, C.S. Edrington, "An alternative distributed control architecture for improvement in the transient response of dc microgrids", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 64, no. 1, pp. 574-584, Jan. 2017, https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2607681.
[26] A.M. Saleh, I. Vokony, M. Waseem, M.A. Khan, A. Al-Areqi, "Power system stability with high integration of RESs and EVs: Benefits, challenges, tools, and solutions", Energy Reports, vol. 13, pp. 2637-2663, June 2025, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.001.
[27] W. Du, M. Han, H. Wang, Y. Zhang, S. Wang, Y. Cheng, "Enhancement of transient reactive power compensation capability for STATCOM based on power balance phase-locked strategy", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 19, no. 1, Article number: e70023, Jan./Dec. 2025, https://doi.org/10.1049/gtd2.70023.
[28] A. Carbonara, S.D. Sessa, A. L'Abbate, F. Sanniti, R. Chiumeo, "Comparison of advanced flexible alternating current transmission system (FACTS) devices with conventional technologies for power system stability enhancement: An updated review", Electronics, vol. 13, no. 21, Article Number: 4262, Oct. 2024, https://doi.org/10.3390/electronics13214262.
[29] K. Sayahi, B. Bouallegue, M. Baazouzi, F. Bacha, "STATCOM and DFIG reactive power management strategy for LVRT capability enhancement under asymmetrical grid faults", International Journal of Energy Research, vol. 2025, Article Number: 7613713, Feb. 2025, https://doi.org/10.1155/er/7613713.
[30] H. Hafaiedh, A. Mahjoub, Y. Saoudi, A. Benamor, O. Taouali, K. Zidi, W. Ghaban, "Optimal location, sizing and technology selection of STATCOM for power loss minimization and voltage profile using multiple optimization methods", CMES- Computer Modeling in Engineering and Sciences, vol. 145, no. 1, pp. 571-596, Oct. 2025, https://doi.org/10.32604/cmes.2025.071642.
[31] H. Mehrkhodavandi, A. Arefi, A. Yazdani, M.C. Joseph, "Hybrid SC-BESS-STATCOM for improved fault ride-through and load disturbance performance in power systems", Energies, vol. 19, no. 11, Article Number: 2614, May 2026, https://doi.org/10.3390/en19112614.
[32] R. Sadiq, Z. Wang, C.Y. Chung, C. Zhou, C. Wang, "A review of STATCOM control for stability enhancement of power systems with wind/PV penetration: Existing research and future scope", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31, no. 11, Article Number: e13079, Nov. 2021, https://doi.org/10.1002/2050-7038.13079.
[33] W. Peres, N.N. Costa, "Comparing strategies to damp electromechanical oscillations through STATCOM with multi-band controller", ISA Transactions, vol. 107, pp. 256-269, Dec. 2020, Dec. 2020, https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.08.005.
[34] T. Deng, Z. Du, W. Zhao, J. Zhang, G. Zhang, "Research on application performance of controllable line-commutated converters with supporting reactive power capability dynamically", Energies, vol. 19, no. 10, Article Number: 2428, May 2026, https://doi.org/10.3390/en19102428.
[35] K. Sayahi, A. khiareddine, F. Bacha, "STATCOM-Active power filter improved hysteresis current control for power quality management under unbalanced and distorted grid voltage", Results in Engineering, vol. 27, Article Number: 107064, Sept. 2025, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107064.
[36] C. Xing, J. Chen, X. Xi, Z. Xu, X. He, S. Li, S. Chen, "Research on the STATCOM mathematical model of battery storage in HVDC transmission system", Front. Energy Res., vol. 10, Article Number: 827914, June 2022, https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.827914.
[37] I. Hamdan, A.M.A. Ibrahim, O. Noureldeen, "Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag", SN Applied Sciences, vol. 2, Article Number: 364, Feb. 2020, https://doi.org/10.1007/s42452-020-2169-6.
[38] S.S. Puhan, R. Sharma, M.K. Mallick, "Ensuring grid resilience: Voltage stability analysis and contingency ranking in electric power systems", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 9, Article Number: 100696, Sept. 2024, https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100696.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[39] H.S. Salama, I. Vokony, "Voltage stability indices- A comparison and a review", Computers and Electrical Engineering, vol. 98, Article Number: 107743, March 2022, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107743.
[40] F.H. Malik, M.W. Khan, T.U. Rahman, M. Ehtisham, M. Faheem, Z.M. Haider, M. Lehtonen, "A comprehensive review on voltage stability in wind-integrated power systems", Energies, vol. 17, no. 3, Article Number: 644, Jan. 2024, https://doi.org/10.3390/en17030644.
[41] A. He, J. Cao, S. Li, L. Gong, M. Yang, J. Hu, "Identifying weak transmission lines in power systems with intermittent energy resources and dc integration", Energies, vol. 17, no. 16. Article Number: 3918, Aug. 2024, https://doi.org/10.3390/en17163918.
[42] X. Yan, W. Deng, G. Wang, A. Rasool, S. Qi, "Research on novel var compensator based on dual-rotary phase-shifting transformers and its control strategy", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 144, Article Number: 108632, Jan. 2023, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108632.
[43] M. Mahdavian, N. Wattanapongsakorn, G. Shahgholian, M. Azadeh, S. Farazpey, M. Janghorbani, "Analysis and simulation of damping low frequency oscillations using STATCOM", Proceeding of the IEEE/ECTI-CON, pp. 1-6, Chiang Mai, Thailand, June/July 2016, https://doi.org/10.1109/ECTICon.2016.7561234.
[44] S. Sreedharan, T. Joseph, S. Joseph, C.V. Chandran, I. Vishnu, P.V. Das, "Power system loading margin enhancement by optimal STATCOM integration- A case study", Computers and Electrical Engineering, vol. 81, Article Number: 106521, Jan. 2020, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106521.
[45] G. Shahgholian, S. Fazeli-Nejad, M. Moazzami, M. Mahdavian, M. Azadeh, M. Janghorbani, S. Farazpey, "Power system oscillations damping by optimal coordinated design between PSS and STATCOM using PSO and ABC algorithms", Proceeding of the IEEE/ECTI-CON, Chiang Mai, Thailand, pp. 1-6, July 2016, https://doi.org/10.1109/ECTICon.2016.7561458.
[46] O.A. Hussein, A.N.B. Alsammak, "Challenges of transformers OLTC operation in the power system that includes solar PV systems and FACTS devices", Electricity, vol. 7, no. 3, Article Number: 65, June 2026, https://doi.org/10.3390/electricity7030065.
[47] H.A. Khan, M. Zuhaib, M. Rihan,"Voltage fluctuation mitigation with coordinated OLTC and energy storage control in high PV penetrating distribution network", Electric Power Systems Research, vol. 208, Article Number: 107924, July 2022, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107924.
[48] M. Chang, J. Cha, G. Jang, "Static synchronous compensator control strategy using voltage sensitivity", IFAC-PapersOnLine, vol. 56, no. 2, pp. 447-450, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1608.
[49] K. Alzaareer, M. Saad, H. Mehrjerdi, H.M.K. Al-Masri, A.Q. Al-Shetwi, D. Asber, S. Lefebvre, "New voltage sensitivity analysis for smart distribution grids using analytical derivation: ABCD model", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 137, Article Number: 107799, May 2022, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107799.
[50] H. Hein, J. Zhu, L. Yu, Z. Liu, X. Liu, S. Xu, Y. Hao, "Voltage control strategies in distribution systems with high distributed generation penetration: models, methods and future research", IET Energy Systems Integration, vol. 8, no. 1, Article number: e70036, Jan./Dec. 2026, https://doi.org/10.1049/esi2.70036.
[51] Z. Cheng, L. Wang, C. Su, R. Zhang, X. Li, B. Zhang, "Data-driven coordinated voltage control strategy for distribution networks with high proportion of renewable energy based on voltage–power sensitivity", Sustainability, vol. 17, no. 11, Article Number: 4955, May 2025, https://doi.org/10.3390/su17114955.
[52] Y. Hou, T. Xu, Y. Li, M. Zhu, Z. He, "Data-driven transient stability assessment of power systems with renewable energy integration and FACTS-based control strategies", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 172, Article Number: 111253, Nov. 2025, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111253.
[53] K. Xu, X. Zhang, S. Liao, L. Qiu, "Disturbed optimal power flow with renewable source and static synchronous compensator", Expert Systems with Applications, vol. 295, Article Number: 128799, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128799.
[54] O.M. Neda, "A dual placement strategy for DG and D-STATCOM units using multi-objective optimization in an Iraqi radial distribution system", Expert Systems with Applications, vol. 299, Article Number: 130230, March 2026, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130230.
[55] O.F. Amakiri, G. Ofualagba, J.N. Onah, "Voltage collapse prediction and control of a power system using hybridized classical probability theory and voltage stability indices", Discover Electronics, vol. 3, Article Number: 71, May 2026, https://doi.org/10.1007/s44291-026-00211-0.
[56] C. Guo, L. Zhong, J. Zhao, G. Gao, "Single-phase reactive power compensation control for STATCOMs via unknown system dynamics estimation", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, Article Number: 8394513, May 2020, https://doi.org/10.1155/2020/8394513.
[57] V. Azbe, R. Mihalic, "STATCOM control strategies in energy-function-based methods for the globally optimal control of renewable sources during transients", International Journal of Electrical Power and

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

Energy Systems, vol. 141, Article Number: 108145, Oct. 2022, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108145.
[58] S.M. Lamine, B. Soltane, G. Malak, N.A.L. Ahmed, "Improved voltage regulation using fuzzy logic-based based static synchronous compensator controllers with stacked multi-cell multi-level inverter in modern power grids", Energy Reports, vol. 14, pp. 3286-3297, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.10.017.
[59] M. Li, W. Li, J. Zhao, W. Chen, W. Yao, "Three-layer coordinated control of the hybrid operation of static var compensator and static synchronous compensator", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 10, no. 9, pp. 2185-2193, June 2016, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1325.
[60] K.P. Patel, N.A. Patel, J.P. Chaudhari, H.K. Mewada, "Optimal placement of DSTATCOMs and PID tuned controller in IEEE bus system for enhanced voltage stability and power loss reduction under RES integration using hybrid BWO-SSA algorithm", Results in Engineering, vol. 28, Article Number: 108216, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108216.
[61] M. Mokhtari, S. Zouggar, N.K. M'sirdi, M.L. Elhafyani, "Sliding mode & single input fuzzy logic controllers for voltage regulation of an asynchronous wind turbine Using STATCOM", IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 2, pp. 12803-12808, Dec. 2020, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1944.
[62] A. Shufian, S.K. Shib, D.R. Dipto, M.T. Rahman, N. Hannan, S.A. Fattah, "Fuzzy logic-controlled three-phase dynamic voltage restorer for enhancing voltage stabilization and power quality", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 166, Article Number: 110517, May 2025, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110517.
[63] X. Chen, Y. Zhang, S. Wang, J. Chen, C. Gong, "Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 32, no. 1, pp. 274-283, Jan. 2017, https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2533563.
[64] F.G. Chremk, H. Medhaffar, "Power quality enhancement in high-voltage transmission systems using STATCOM by type 1 and type 2 fuzzy logic controllers", International Journal of Computational Intelligence Systems, vol. 17, Article Number: 238, Sept. 2024, https://doi.org/10.1007/s44196-024-00636-z.
[65] A.A.Z. Diab, T. Ebraheem, R. Aljendy, H.M. Sultan, Z.M. Ali, "Optimal design and control of MMC STATCOM for improving power quality indicators", Applied Sciences, vol. 10, no. 7, Article Number: 2490, April 2020, https://doi.org/10.3390/app10072490.
[66] F. Tlili, M. B. Slimene, M. A. Khlifi, F. Bacha, "Study of the flicker phenomenon induced in the electric arc furnace of the steel factory in tunisia", IEEE Access, vol. 12, pp. 174850-174858, Nov. 2024, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3502428.
[67] P. Shafaghi, G. Shahgholian, A. Etesami, S. Khalili, "The effect of corrosion of electrodes in the electric arc furnaces model", Proceeding of the IEEE/ICCEE, pp. 35-39, Dubai, United Arab Emirates, Dec. 2009, https://doi.org/10.1109/ICCEE.2009.96.
[68] A.A. Abdalla, M.S.E. Moursi, T.H.M. El-Fouly, K.H.A. Hosani, "A state-of-the-art review of adaptive, predictive, synergistic, and degradation-aware power variability smoothing techniques in photovoltaic power plants", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 230, Article Number: 116687, April 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116687.
[69] G. Shahgholian, M. Golibagh, "Compensation for power quality improvement in electric arc furnace with considering economic index", Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 6, no 1, pp. 62-69, March 2012.
[70] H.C. Seo, "New adaptive reclosing technique using second-order difference of THD in distribution system with BESS used as uninterruptible power supply", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 90, pp. 315-322, Sept. 2017, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.02.012.
[71] G. Shahgholian, B. Bayat, "A new control technique for improving the oscillations and decreasing the harmonic components of voltage in STATCOM", International Review of Electrical Engineering, vol. 6, no. 6, pp. 3163-3174, 2011.
[72] A. Shoulaie, M. Bayati-Poudeh, G. Shahgholian, "Damping torsional torques in turbine-generator shaft by novel PSS based on genetic algorithm and fuzzy logic", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 1, no. 2, pp. 3-10, Sept. 2010, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1389.1.2.1.2.
[73] F. Gholami, M. Hashemi, G. Shahgholian, "Actuator fault event-triggered compensation for multiagent fractional-order nonlinear systems", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 9, no. 1, Article Number: 092503, March 2025, https://doi.org/10.57647/j.spre.2025.0901.03.
[74] G. Rajendran, R. Raute, C. Caruana, "A comprehensive review of solar PV integration with smart-grids: challenges, standards, and grid codes", Energies, vol. 18, no. 9, Article Number: 2221, April 2025, https://doi.org/10.3390/en18092221.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[75] G. Shahgholian, S.M.A. Zanjani, "A study of voltage sag in distribution system and evaluation of the effect of wind farm equipped with doubly-fed induction generator", Revue Roumaine des Sciences Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 271-276, Dec. 2023, https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.3.4.
[76] T.T. Ku, C.H. Lin, C.S. Chen, Y.D. Lee, J.L. Jiang, S.J. Tzeng, C.M. Chan, "A distribution static synchronous compensator application to mitigate voltage variation for distribution feeders", Sustainability, vol. 15, no. 15, Article Number: 11618, July 2023, https://doi.org/10.3390/su151511618.
[77] Z. Ullah, M.D. Santis, L. Rubino, "Inertia response and frequency stability in renewable energy-dominated power systems: Review of virtual inertia techniques", Energies, vol. 19, no. 13, Article Number: 3063, June 2026, https://doi.org/10.3390/en19133063.
[78] A.B. Chivukula, S. Maiti, "Analysis and control of modular multilevel converter-based E-STATCOM to integrate large wind farms with the grid", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 13, no. 20, pp. 4604-4616, Oct. 2019, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5928.
[79] S. Babaei, S. Bhattacharya, "A control structure for PWM-controlled static synchronous compensators under unbalanced conditions and grid faults", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 71, pp. 160-173, Oct. 2015, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.02.035.
[80] X. Wang, F. Feng, L. Peng, P. Xiao, Z. Li, "Stability analysis and virtual inductance control for static synchronous compensators with voltage-droop support in weak grid", Electronics, vol. 14, no. 11, Article Number: 2203, May 2025, https://doi.org/10.3390/electronics14112203.
[81] U. Mumtahina, S. Alahakoon, P. Wolfs, "A literature review on the optimal placement of static synchronous compensator (STATCOM) in distribution networks", Energies, vol. 16, no. 17, Article Number: 6122, Aug. 2023, https://doi.org/10.3390/en16176122.
[82] Y. Cao, Y. Song, X. Liu, C. Li, "Parameter identification of synchronous condenser and its excitation system considering multivariate coupling and symmetry characteristic", Symmetry, vol. 16, no. 12, Article Number: 1596, Nov. 2024, https://doi.org/10.3390/sym16121596.
[83] X. Huang, J. Zeng, T. Wang, S. Zeng, "An off-policy maximum entropy deep reinforcement learning method for data-driven secondary frequency control of island microgrid", Applied Soft Computing, vol. 170, Article Number: 112694, Feb. 2025, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112694.
[84] O.D. Garzon, A.B. Nassif, M. Rahmatian, "Grid forming technologies to improve rate of change in frequency and frequency nadir: Analysis-based replicated load shedding events", Electronics, vol. 13, no. 6, Article Number: 1120, March 2024, https://doi.org/10.3390/electronics13061120.
[85] M.O. Qays, I. Ahmad, D. Habibi, M.A.S. Masoum, "Assessing techno-economic performance of synchronous condensers and static synchronous compensators in renewable energy-integrated weak-grids using hedge feedforward feedback-based online gated recurrent unit", IET Smart Grid, vol. 8, no. 1, Article Number: e70022, Jan./Dec. 2025, https://doi.org/10.1049/stg2.70022.
[86] L.K. Sahoo, S. Mishra, S.K. Dash, "Optimal integration of D-STATCOMs in grid-tied microgrid consisting of renewable DGs and EV charging stations using improved snow ablation optimizer", Applied Energy, vol. 381, Article Number: 125143, March 2025, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125143.
[87] Y. Cao, Y. Song, X. Liu, C. Li, "Parameter identification of synchronous condenser and its excitation system considering multivariate coupling and symmetry characteristic", Symmetry, vol. 16, no. 12, Article Number: 1596, Nov. 2024, https://doi.org/10.3390/sym16121596.
[88] A.A. Bozkurt, "Real-time implementation of auto-tuned PID control in PMSM drives", Machines, vol. 14, no. 1, Article Number: 100, Jan. 2026, https://doi.org/10.3390/machines14010100.
[89] P. Kasinathan, R. Vairamani, S. Sundramoorthy, "Dynamic performance investigation of d–q model with PID controller-based unified power-flow controller", IET Power Electronics, vol. 6, no. 5, pp. 843-850, May 2013, https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0551.
[90] Y. Levron, J. Belikov, D. Baimel, "A tutorial on dynamics and control of power systems with distributed and renewable energy sources based on the DQ0 transformation", Applied Sciences, vol. 8, no. 9, Article Number: 1661, Sept. 2018, https://doi.org/10.3390/app8091661.
[91] K.J. Mpiana, S. Chowdhury, "A delay-modulated PWM control framework for active and reactive power control in an energy distribution network with high penetration of electric vehicle charging load", Energies, vol. 19, no. 6, Article Number: 1560, March 2026, https://doi.org/10.3390/en19061560.
[92] R. Chen, X. Zheng, S. Pang, X. Li, "Based on STATCOM direct current full-order terminal sliding mode control", The Journal of Engineering, vol. 2017, no. 13, pp. 2067-2071, Dec. 2017, https://doi.org/10.1049/joe.2017.0693.
[93] A. Hadipoor, S. Azargoshasb, A. Ghasemi, "Robust sliding mode control of robot manipulators using the fourier series expansion in the presence of uncertainty", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 12, no. 46, pp. 77-91, March 2023, https://doi.org/10.30495/jce.2022.693456.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[94] Y. Mi, Y. Song, Y. Fu, C. Wang, "The adaptive sliding mode reactive power control strategy for wind–diesel power system based on sliding mode observer", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 11, no. 4, pp. 2241-2251, Oct. 2020, https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2952142.
[95] C. Gong, W.K. Sou, C.S. Lam, "Reinforcement learning based sliding mode control for a hybrid-STATCOM", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 38, no. 6, pp. 6795-6800, June 2023, https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3247835.
[96] A.M.. Nassef, M.A. Abdelkareem, H.M. Maghrabie, A. Baroutaji, "Review of metaheuristic optimization algorithms for power systems problems", Sustainability, vol. 15, no. 12, Article Number: 9434, June 2023, https://doi.org/10.3390/su15129434.
[97] D.P. Ladumor, I.N. Trivedi, R.H. Bhesdadiya, P. Jangir, "Optimal power flow problems solution with STATCOM using meta-heuristic algorithm", Proceeding of the IEEE/AEEICB, pp. 392-396, Chennai, India, Feb. 2017, https://doi.org/10.1109/AEEICB.2017.7972339.
[98] A.M. Nori, A.K. Abdulabbas, O. Alrumayh, T.M. Aljohani, "Robust voltage stability enhancement of DFIG systems using deadbeat-controlled STATCOM and ADRC-based supercapacitor support", Mathematics, vol. 14, no. 8, April 1254, April 2026, https://doi.org/10.3390/math14081254.
[99] Y. Huang, Y. Yang, H. Wang, "Modeling and simulation of power quality detection for tidal current power generation based on HHT", Energy Reports, vol. 9, pp. 957-964, Sept. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.018.
[100] M.N. Iqbal, L. Kütt, B. Asad, T. Vaimann, A. Rassõlkin, G.L. Demidova, "Time dependency of current harmonics for switch-mode power supplies", Applied Sciences, vol. 10, no. 21, Article Number: 7806, Oct. 2020, https://doi.org/10.3390/app10217806.
[101] S.S. Rangarajan, J. Sharma, C.K. Sundarabalan, "Novel exertion of intelligent static compensator based smart inverters for ancillary services in a distribution utility network-review", Electronics, vol. 9, no. 4, Article Number: 662, April 2020, https://doi.org/10.3390/electronics9040662.
[102] W. Akram, A.P. Memon, M.I. Jamali, M.A. Koondhar, Z.M. Alaas, E. Touti, M.H. Alsharif, M. Kim, "Optimal coordinative design of SVC and PSS with the application of neural network to improve power system transient stability", Ain Shams Engineering Journal, vol. 16, no. 12, Article Number: 103790, Dec. 2025, https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103790.

زیرنویس‌ها:

[1] Smart Grids
[2] Converter-Based Resources
[3] Variable Frequency Drives
[4] Flexible Alternating Current Transmission System
[5] Static Synchronous Compensator
[6] Voltage Source Converter
[7] Operational Indices
[8] Voltage Recovery Time
[9] Voltage Stability Analysis
[10] Voltage Stability Index
[11] Power Oscillation Damping
[12] Electric Arc Furnaces
[13] Uncertainty
[14] Sliding mode control

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026