KNO-1204-5003

# بهبود پایداری و جنبه‌های اقتصادی استفاده از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC)در مزارع بادی مبتنی برDFIG

علی رضایی ali_rezaei@ut.ac.ir

استادیار ،گروه مهندسی سیستم و مکاترونیک دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

## چکیده

رشد شتابان استفاده از انرژی بادی در شبکه‌های قدرت مدرن، اگرچه نقش مهمی در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و تنوع‌بخشی به منابع انرژی ایفا می‌کند، اما چالش‌های فنی و اقتصادی جدیدی را نیز به همراه داشته است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، حفظ پایداری سیستم قدرت در حضور مزارع بادی بزرگ، به‌ویژه مزارعی است که از ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) استفاده می‌کنند و از طریق خطوط انتقال طولانی و جبران‌سازی‌شده سری به شبکه متصل هستند. جبران‌سازی سری، اگرچه ظرفیت انتقال توان را افزایش می‌دهد، می‌تواند منجر به بروز نوسانات زیر سنکرون (SSO/SSR) و کاهش پایداری دینامیکی سیستم شود. در این مقاله، استفاده از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) به‌عنوان یکی از ادوات FACTS پیشرفته برای بهبود پایداری دینامیکی و افزایش بهره‌وری اقتصادی مزارع بادی مبتنی بر DFIG مورد بررسی جامع قرار گرفته است. سیستم مورد مطالعه شامل یک مزرعه بادی ۹،۶ مگاواتی متشکل از شش توربین بادی ۱،۶ مگاواتی است که از طریق یک خط انتقال ۱۲۰ کیلوولت جبران‌سازی‌شده سری به شبکه بی‌نهایت متصل می‌شود. مدل‌سازی کامل آیرودینامیکی توربین، دینامیک مکانیکی شافت، مدل الکتریکیDFIG ، مبدل‌های الکترونیک قدرت و SSSCدر محیط MATLAB/Simulink انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از SSSC موجب کاهش قابل توجه دامنه نوسانات توان اکتیو و راکتیو، بهبود پایداری سیگنال کوچک و گذرا، و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می شود. علاوه بر این، تحلیل اقتصادی انجام شده نشان می‌دهد که علی‌رغم هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، استفاده از SSSC در بلندمدت منجر به کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال، جلوگیری از خسارات ناشی از ناپایداری و در نتیجه صرفه اقتصادی قابل توجه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: پایداری سیستم قدرت، ژنراتور القایی دوسوتغذیه، جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی، نوسانات زیرسنکرون، ادوات FACTS، تحلیل اقتصادی.

## ۱ .مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد مصرف انرژی الکتریکی در کنار نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، سیاست‌گذاران و مهندسان را به سمت توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر سوق داده است. انرژی بادی به‌عنوان یکی از پاک‌ترین و اقتصادی‌ترین منابع تجدیدپذیر، سهم قابل توجهی از ظرفیت تولید برق جدید در بسیاری از کشورها را به خود اختصاص داده است. پیشرفت‌های فناورانه در طراحی توربین‌های بادی و سیستم‌های کنترلی، امکان بهره‌برداری بهینه از انرژی باد در شرایط متغیر را فراهم کرده است.

یکی از پرکاربردترین ساختارها در مزارع بادی مدرن، استفاده از ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) است. این نوع ژنراتور به دلیل قابلیت عملکرد در سرعت متغیر، کاهش اندازه مبدل الکترونیک قدرت و امکان کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو، به گزینه‌ای جذاب برای بهره‌برداران شبکه تبدیل شده است. با این حال، افزایش ظرفیت مزارع بادی و اتصال آن‌ها به شبکه از طریق خطوط انتقال طولانی، مسائل جدیدی در زمینه پایداری سیستم قدرت ایجاد کرده است. به‌منظور افزایش ظرفیت انتقال توان در خطوط طولانی، از جبران‌سازی سری خازنی استفاده می‌شود. این روش اگرچه از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، اما می‌تواند باعث ایجاد پدیده نوسانات زیرسنکرون شود. این نوسانات در اثر تعامل بین دینامیک مکانیکی سیستم‌های دوار و ویژگی‌های الکتریکی شبکه به وجود می‌آیند و در صورت عدم کنترل مناسب، ممکن است منجر به ناپایداری شدید و آسیب جدی به تجهیزات شوند.

در سال‌های اخیر، استفاده از ادوات FACTS به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود پایداری و کنترل توان در شبکه‌های قدرت مورد توجه قرار گرفته است. جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) یکی از این ادوات است که با تزریق ولتاژ کنترل‌پذیر به‌صورت سری در خط انتقال، امکان کنترل دینامیکی توان و میرایی نوسانات را فراهم می‌کند. هدف اصلی این مقاله، ارائه یک بررسی جامع و تحلیلی از تأثیر SSSC بر بهبود پایداری و جنبه‌های اقتصادی مزارع بادی مبتنی بر DFIG است.

## ۲ .مروری بر مطالعات پیشین

مطالعات متعددی در سال‌های اخیر به بررسی پایداری مزارع بادی و اثرات جبران سازی سری پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که مزارع بادی مبتنی بر DFIG در حضور جبران‌سازی سری خازنی، مستعد بروز نوسانات زیرسنکرون هستند. برخی پژوهش‌ها استفاده از کنترل‌کننده‌های کمکی در مبدل روتور را پیشنهاد داده‌اند، در حالی که مطالعات دیگر به استفاده از ادوات FACTS مانند STATCOM، TCSC و SSSC پرداخته‌اند.

در مقایسه باTCSC ، جبران ساز سری سنکرون استاتیکی به دلیل پاسخ سریع‌تر و قابلیت کنترل دقیق‌تر، عملکرد بهتری در میرایی نوسانات از خود نشان داده است. با این حال، بسیاری از مطالعات پیشین تمرکز اصلی خود را بر تحلیل فنی گذاشته و به جنبه‌های اقتصادی استفاده از SSSC کمتر پرداخته‌اند. در این مقاله تلاش شده است تا علاوه بر تحلیل فنی، ارزیابی اقتصادی جامعی نیز ارائه شود.

## ۳ .معرفی سیستم قدرت مورد مطالعه

سیستم قدرت مورد مطالعه شامل یک مزرعه بادی با ظرفیت نامی ۹،۶ مگاوات است که از شش توربین بادی ۱،۶ مگاواتی تشکیل شده است. هر توربین بادی به یک ژنراتور DFIG متصل بوده و از طریق ترانسفورماتور افزاینده به شبکه جمع‌کننده داخلی متصل می‌شود. شبکه جمع‌کننده از طریق یک خط انتقال ۱۲۰ کیلوولت که به‌صورت جزئی جبران‌سازی سری شده است، به شبکه بی‌نهایت متصل می‌گردد. مدل‌سازی سیستم شامل زیرسیستم‌های آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی بوده و تمامی دینامیک‌های اصلی مؤثر بر پایداری سیستم در نظر گرفته شده‌اند. این سطح از مدل‌سازی امکان بررسی دقیق رفتار سیستم در شرایط گذرا و اغتشاشات مختلف را فراهم می‌کند.

## ۴ .مدل‌سازی آیرودینامیکی توربین بادی

توان استخراج‌شده از باد تابعی از سرعت باد، چگالی هوا، سطح جاروب‌شده پره‌ها و ضریب توان توربین است. در این مقاله، مدل استاندارد آیرودینامیکی توربین بادی مورد استفاده قرار گرفته و اثر تغییرات سرعت باد و زاویه گام پره‌ها بر توان خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل نقش مهمی در تحلیل رفتار گذرای سیستم ایفا می‌کند.

## ۵ .مدل‌سازی مکانیکی شافت و ژنراتور

سیستم مکانیکی توربین بادی و ژنراتور به‌صورت یک مدل دوجرمی در نظر گرفته شده است که شامل اینرسی توربین و اینرسی ژنراتور می‌باشد. این مدل قادر است نوسانات پیچشی شافت را که نقش مهمی در پدیده نوسانات زیرسنکرون دارند، به‌خوبی نمایش دهد.

## ۶ .مدل‌سازی ژنراتور القایی دوسوتغذیه(DFIG)

مدل الکتریکی ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) در قاب مرجع سنکرون dq بر مبنای معادلات ولتاژ و شار استاتور و روتور استخراج می‌شود. در این چارچوب، کوپلینگ مغناطیسی بین محورهای d و q و همچنین اندرکنش الکترومغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور به طور کامل در نظر گرفته می‌شود. این مدل امکان تحلیل دقیق رفتار دینامیکی ژنراتور در شرایط گذرا و ماندگار را فراهم می‌سازد.

## ۷ .معرفی و مدل‌سازی جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی(SSSC)

SSSCیک تجهیز FACTS مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ است که به‌صورت سری در خط انتقال نصب می‌شود. این تجهیز قادر است ولتاژی با دامنه و فاز قابل کنترل تزریق کند و از این طریق، امپدانس معادل خط را تغییر دهد. استراتژی کنترلی SSSC در این مقاله بر میرایی نوسانات زیرسنکرون و بهبود پایداری دینامیکی تمرکز دارد.

## ۸ .تحلیل پدیده نوسانات زیرسنکرون

نوسانات زیرسنکرون نتیجه تعامل بین دینامیک مکانیکی سیستم‌های دوار و ویژگی‌های الکتریکی خطوط جبران‌سازی‌شده سری هستند. در این مقاله، این پدیده با استفاده از تحلیل حوزه زمان و تحلیل مقادیر ویژه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که SSSC قادر است با ایجاد میرایی مثبت، از رشد نوسانات جلوگیری کند.

## ۹ .سناریوهای شبیه‌سازی و شرایط کاری

برای ارزیابی عملکرد سیستم، سناریوهای مختلفی شامل تغییر ناگهانی سرعت باد، تغییر بار و اغتشاشات شبکه در نظر گرفته شده است. این سناریوها شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع بادی را شبیه‌سازی می‌کنند.

## ۱۰ .نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ زمانی

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت بدونSSSC ، نوسانات قابل توجهی در توان اکتیو، توان راکتیو و سرعت ژنراتور مشاهده می‌شود. با به‌کارگیریSSSC ، دامنه نوسانات به‌طور چشمگیری کاهش یافته و سیستم به حالت پایدار بازمی‌گردد.

## ۱۱ .تحلیل پایداری سیگنال کوچک

تحلیل مقادیر ویژه سیستم نشان می‌دهد که استفاده از SSSC باعث جابجایی قطب‌های ناپایدار به ناحیه پایدار صفحه مختلط شده و میرایی سیستم افزایش می‌یابد.

## ۱۲ .تحلیل پایداری گذرا

در شرایط بروز اغتشاشات شدید، مانند اتصال کوتاه موقت، سیستم مجهز به SSSC عملکرد بهتری از نظر بازیابی ولتاژ و فرکانس از خود نشان می‌دهد.

## ۱۳ .بررسی اثر پارامترهای کنترلیSSSC

تنظیم مناسب بهره‌های کنترلی SSSC نقش مهمی در عملکرد آن دارد. در این بخش، اثر تغییر پارامترهای کنترلی بر میرایی نوسانات مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱۴ .تحلیل اقتصادی استفاده ازSSSC

تحلیل اقتصادی شامل بررسی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، کاهش تلفات انتقال و جلوگیری از خسارات ناشی از ناپایداری است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از SSSC در بلندمدت توجیه اقتصادی مناسبی دارد.

## ۱۵ .مقایسه با جبران‌سازی سری ثابت

نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که SSSC نسبت به جبران‌سازی سری ثابت، عملکرد فنی و اقتصادی برتری دارد، به‌ویژه در شرایط تغییرات شدید سرعت باد.

## ۱۶ .بحث و تحلیل نتایج

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از SSSC می‌تواند نقش کلیدی در افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت با نفوذ بالای انرژی بادی ایفا کند.

## ۱۷ .ملاحظات بهره‌برداری و اجرایی

بهره‌برداری عملی از جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) در مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) مستلزم توجه هم‌زمان به ملاحظات فنی، حفاظتی، کنترلی و اقتصادی است. در این راستا، نکات زیر به‌عنوان الزامات اجرایی پیشنهاد می‌شود:

### ۱-۱۷ .مکان‌یابی بهینه تجهیز

تعیین محل نصب SSSC نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی آن در میرایی نوسانات زیرسنکرون دارد. انجام مطالعات پخش بار، تحلیل مودال و بررسی حساسیت پارامترها پیش از نصب ضروری است. نتایج این مطالعات می‌تواند بهترین نقطه اتصال را، معمولاً در ابتدای خط انتقال و نزدیک به مزرعه بادی، مشخص نماید تا بیشترین تأثیر بر کنترل توان و پایداری دینامیکی حاصل شود.

### ۲-۱۷ .هماهنگی حفاظتی

نصب SSSC موجب تغییر مشخصات امپدانسی خط انتقال می‌شود؛ ازاین‌رو بازتنظیم رله‌های دیستانس، اضافه‌جریان و حفاظت دیفرانسیل ضروری است. همچنین، هماهنگی بین سیستم‌های حفاظتی خط، ترانسفورماتورها و مبدل‌های DFIG باید مجدداً ارزیابی شود. تحلیل سناریوهای خطا و بررسی قابلیت تحمل خطا (Fault Ride Through) پیش از بهره‌برداری رسمی توصیه می‌شود.

### ۱۷-۳ .طراحی و تنظیم سیستم کنترلی

کارایی SSSC وابسته به طراحی مناسب ساختار کنترلی و تنظیم دقیق بهره‌ها است. استفاده از روش‌های تنظیم بهینه پارامترها و در صورت امکان کنترل تطبیقی، می‌تواند عملکرد تجهیز را در شرایط تغییرات شدید سرعت باد و اغتشاشات شبکه بهبود بخشد. همچنین، بهره‌گیری از سامانه‌های پایش برخط برای ثبت و تحلیل رفتار دینامیکی سیستم پیشنهاد می‌شود.

### ۱۷-۴ .قابلیت اطمینان و نگهداری

با توجه به ماهیت الکترونیک قدرتSSSC ، قابلیت اطمینان آن به کیفیت نیمه‌هادی‌ها، طراحی سیستم خنک‌کاری و حفاظت داخلی وابسته است. طراحی ماژولار، پیش‌بینی سیستم‌های افزونه (Redundancy) و برنامه‌ریزی دقیق تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)می‌تواند احتمال خروج ناخواسته تجهیز از مدار را کاهش دهد.

### ۱۷-۵ .ملاحظات اقتصادی اجرایی

گرچه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه SSSC نسبت به جبران‌سازی سری ثابت بیشتر است، اما در ارزیابی اجرایی باید کاهش تلفات، افزایش ظرفیت انتقال، جلوگیری از آسیب مکانیکی تجهیزات و کاهش خاموشی‌های ناخواسته در نظر گرفته شود. انجام تحلیل‌های اقتصادی نظیر دوره بازگشت سرمایه و ارزش فعلی خالص پیش از تصمیم‌گیری نهایی ضروری است.

### ۱۷-۶ .انطباق با الزامات شبکه

عملکرد SSSC باید منطبق با الزامات اتصال به شبکه و استانداردهای کیفیت توان باشد. رعایت حدود مجاز نوسانات ولتاژ، کنترل توان راکتیو و حفظ پایداری فرکانس از جمله الزامات بهره‌برداری ایمن و پایدار محسوب می‌شود.

## ۱۸ .پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش پیرامون به‌کارگیری جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی (SSSC) در مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسوتغذیه(DFIG) ، زمینه‌های متعددی برای توسعه تحقیقات آینده قابل پیشنهاد است:

### ۱۸-۱ .توسعه روش‌های کنترلی هوشمند

استفاده از کنترل‌کننده‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند:

- کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی
- شبکه‌های عصبی مصنوعی
- الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

می‌تواند موجب بهبود عملکرد میرایی نوسانات زیرسنکرون در شرایط عدم قطعیت سرعت باد و تغییرات پارامترهای شبکه شود. مقایسه عملکرد این روش‌ها با کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد.

### ۱۸-۲ .ترکیب SSSC با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

ادغام SSSC با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌ها یا ابرخازن‌ها می‌تواند انعطاف‌پذیری بیشتری در کنترل توان و پایداری شبکه فراهم کند. بررسی اثر هم‌زمان کنترل توان اکتیو و راکتیو در حضور ذخیره‌سازها، یکی از مسیرهای مهم تحقیقاتی آینده محسوب می‌شود.

### ۱۸-۳ .تحلیل در مقیاس شبکه‌های بزرگ با نفوذ بالای انرژی بادی

در این مقاله، یک مزرعه بادی با ظرفیت محدود بررسی شده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، عملکرد SSSC در شبکه‌های گسترده با چندین مزرعه بادی و نفوذ بالای انرژی تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گیرد تا تعاملات بین‌ناحیه‌ای و مودهای نوسانی پیچیده‌تر تحلیل شوند.

### ۱۸-۴ .بررسی تأثیر عدم قطعیت‌ها و مدل‌سازی احتمالاتی

مطالعه تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات سرعت باد، خطاهای اندازه‌گیری و تغییرات پارامترهای شبکه با استفاده از روش‌های احتمالاتی و تحلیل مونت‌کارلو می‌تواند دیدگاه جامع‌تری نسبت به قابلیت اطمینان سیستم ارائه دهد.

### ۱۸-۵ .مقایسه جامع با سایر ادواتFACTS

بررسی عملکرد SSSC در مقایسه با تجهیزاتی نظیرSTATCOM ، TCSCو UPFC از منظر فنی، اقتصادی و پیچیدگی کنترلی می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب تجهیز مناسب برای شبکه‌های بادی کمک نماید.

### ۱۸-۶ .تحلیل عمر مفید و ارزیابی چرخه عمر(LCC)

تحقیقات آینده می‌تواند شامل تحلیل چرخه عمر تجهیز، هزینه‌های نگهداری بلندمدت، نرخ خرابی و اثرات زیست‌محیطی ساخت و بهره‌برداری از SSSC باشد تا ارزیابی اقتصادی جامع‌تری ارائه شود.

### ۱۸-۷ .اعتبارسنجی تجربی و پیاده‌سازی آزمایشگاهی

انجام مطالعات تجربی در مقیاس آزمایشگاهی یا پایلوت صنعتی می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را اعتبارسنجی کرده و چالش‌های عملی پیاده‌سازی را مشخص نماید. توسعه سکوی آزمایشگاهی مبتنی بر HIL (Hardware-in-the-Loop) نیز پیشنهاد می‌شود.

### جمع‌بندی

گسترش پژوهش‌ها در حوزه کنترل پیشرفته، تحلیل احتمالاتی، ادغام با ذخیره‌سازها و اعتبارسنجی تجربی می‌تواند مسیر توسعه عملی استفاده از SSSC در مزارع بادی مبتنی بر DFIG را هموارتر ساخته و به افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌وری اقتصادی شبکه‌های قدرت با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر منجر شود.

## ۱۹ .نتیجه‌گیری نهایی

در این مقاله، تأثیر جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی بر بهبود پایداری و عملکرد اقتصادی مزارع بادی مبتنی بر DFIG به‌صورت جامع بررسی شد. نتایج نشان داد که SSSC ابزار مؤثری برای مهار نوسانات زیرسنکرون و افزایش پایداری سیستم قدرت است.

### ۱. ۱۹- روابط ریاضی حاکم بر سیستم

توان آیرودینامیکی استخراج‌شده از باد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_w = 0.5 \rho A C_p(\lambda,\beta) V_w^3$$

که در آن $\rho$ چگالی هوا، $A$ سطح جاروب‌شده پره‌ها، $C_p$ ضریب توان توربین، $\lambda$ نسبت سرعت نوک پره و $\beta$ زاویه گام پره است.

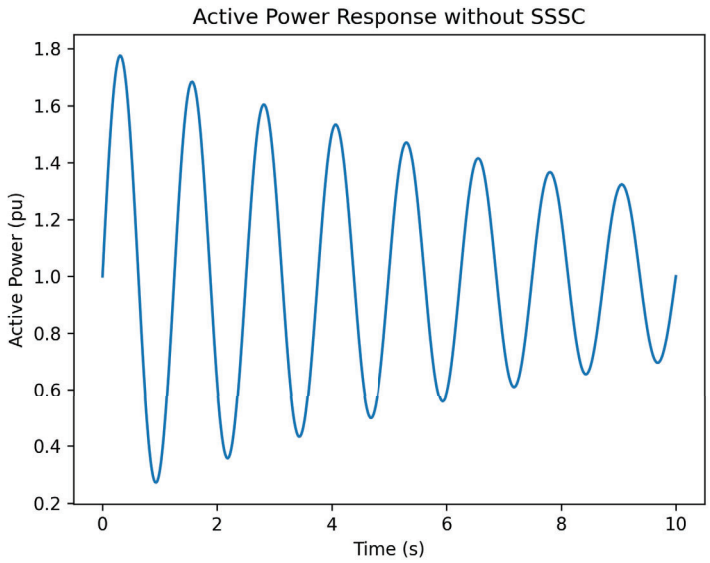
معادلات ولتاژ ژنراتور DFIG در قاب مرجع dq به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$V_ds = R_s I_ds + d\psi_ds/dt - \omega_s \psi_qs$$
$$V_qs = R_s I_qs + d\psi_qs/dt + \omega_s \psi_ds$$

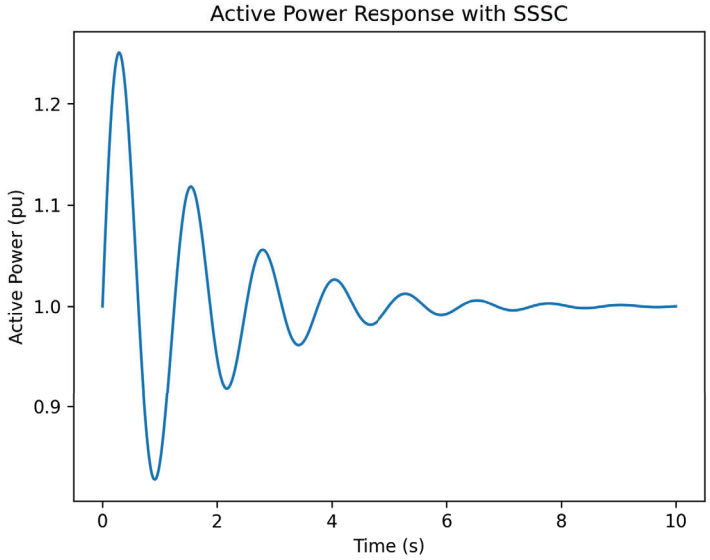
ولتاژ تزریقی جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی به صورت یک ولتاژ کنترل‌پذیر سری با دامنه و فاز قابل تنظیم مدل می‌شود.

### ۲. ۱۹- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ زمانی

به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم، پاسخ زمانی توان اکتیو مزرعه بادی در دو حالت بدون استفاده از SSSC و با استفاده از SSSC مورد بررسی قرار گرفته است .در حالت بدونSSSC ، نوسانات توان با دامنه زیاد و میرایی ضعیف مشاهده می‌شود، در حالی که با نصب SSSC، دامنه نوسانات به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و سیستم در مدت زمان کوتاه‌تری به حالت پایدار بازمی‌گردد.




شکل .1 پاسخ زمانی توان اکتیو مزرعه بادی در حالت بدون استفاده ازSSSC




شکل .2 پاسخ زمانی توان اکتیو مزرعه بادی در حضور جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی(SSSC)

### ۳ .جدول نتایج شبیه‌سازی

| وضعیت پایداری | زمان میرایی(s) | دامنه نوسان توان(pu) | حالت سیستم |
|---|---|---|---|
| نسبتاً ناپایدار | 8 | 0.8 | بدونSSSC |
| پایدار | 2 | 0.3 | باSSSC |

### ۴ .نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی به‌عنوان یک ابزار کنترلی قدرتمند، قادر است پایداری دینامیکی مزارع بادی مبتنی بر DFIG را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد .علاوه بر مزایای فنی، تحلیل اقتصادی نیز بیانگر آن است که استفاده از SSSCدر بلندمدت منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات و ناپایداری شده و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است.

## ۲۰ .منابع

[1] H. A. Mohammadpour and R. M. Nelms, “Modal analysis of DFIG-based wind farms connected to series-compensated networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2394–2402, 2014.

[2] A. Rashad et al., “Stability enhancement of wind-integrated power systems using FACTS devices,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 823–835, 2020.

[3] X. Zhu and J. Chow, “Sub-synchronous oscillation mitigation using FACTS devices,” *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 31–40, 2019.

[4] J. Morsali et al., “Subsynchronous resonance mitigation in series-compensated transmission lines using FACTS controllers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1585–1593, 2015.

[5] Y. Xu et al., “Review of subsynchronous oscillation in wind-integrated power systems,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 121, 109690, 2020.

[6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
Power System Stability and Control

[7] S. S. Chen et al., “Subsynchronous oscillations in power systems: modeling and mitigation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 1234–1245, 2019.
IEEE Transactions on Power Systems

[8] H. A. Mohammadpour and R. M. Nelms, “Modal analysis of DFIG-based wind farms connected to series-compensated networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014.

[9] X. Zhu and J. Chow, “Sub-synchronous oscillation mitigation using FACTS devices,” *Electric Power Systems Research*, Elsevier, 2019.
Electric Power Systems Research

[10] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, NY, USA: IEEE Press, 2000.
Understanding FACTS: Concepts and Technology

[11] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, 2nd ed. Wiley, 2012.
Wind Power in Power Systems

[12] R. Peña, J. Clare, and G. Asher, “Doubly fed induction generator using back-to-back converters,” *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, 1996.

[13] J. G. Slootweg and W. L. Kling, “Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator,” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003.

[14] Y. Xu et al., “Review of subsynchronous oscillation in wind-integrated power systems,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020.
Renewable & Sustainable Energy Reviews

[15] M. Ghasemi et al., “FACTS-based control strategies for stability enhancement of renewable-integrated grids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, 106889, 2021.
International Journal of Electrical Power & Energy Systems

[16] S. Chen et al., “Mitigation of subsynchronous resonance in DFIG-based wind farms,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 4, pp. 612–624, 2022.
IET Renewable Power Generation

[17] International Energy Agency (IEA), *Economic Analysis of Wind Power Integration*, Paris, France, 2021.
International Energy Agency

[18] CIGRE Working Group, *Economic Benefits of FACTS Devices in Transmission Systems*, CIGRE Technical Brochure, 2019.
CIGRE