

## عملکرد کنترلی توربین های بادی DFIG در حالت فوق سنکرون و زیر سنکرون

مهدی شفیعی<sup>۱</sup>، عباسعلی زمانی<sup>۲</sup>، علی اکبر خانه گیر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران m-shafiee@tvu.ac.ir

<sup>۲</sup>استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران a-zamani@tvu.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران alikh9@gmail.com

### چکیده

در توربین های بادی صنعتی، منابع مختلفی از عدم اطمینان، آشفتگی و نویز وجود دارد. بنابراین، بهره وری از استراتژی های کنترل قوی غیرقابل انکار است. در این پژوهش کنترل قوی چند متغیره غیرخطی توربین بادی محور افقی در شرایط عملیاتی مختلف و در صورت عدم قطعیت مورد بررسی قرار می گیرد. در مدل چند متغیره پیشنهادی، سرعت روتور و جریان روتور (به عنوان متغیرهای کنترل شده) از طریق دو ولتاژ ژنراتور (به عنوان سیگنال های کنترل) کنترل می شوند. برای دستیابی به این موضوع دو استراتژی کنترلی فوق سنکرون و زیر سنکرون ارائه شده است. بررسی نتایج شبیه سازی توانایی بالای ساختار کنترلی توربین بادی در حالت های کاری مختلف را نشان می دهد.

### واژه های کلیدی

توربین بادی، ژنراتور القایی از دوسو تغذیه DFIG، کنترل مقاوم.

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## ۱. مقدمه

تاریخچه استفاده از انرژی باد به دوران باستان برمی گردد، هنگامی که از آن برای حرکت کشتی های بادی در دریا استفاده می شد. کاربرد انرژی باد از ایران سرچشمه گرفته است. بعد از فتح ایران توسط اعراب، این فناوری به مناطق در اختیار اعراب و چین منتقل شد. در اروپا، توربین های بادی در قرن یازدهم میلادی ساخته و بعد از دو قرن به یک وسیله بسیار مهم تبدیل شدند. اولین توربین بادی برای تولید انرژی الکتریکی در اوهایو آمریکا ساخته شد. این توربین دارای ۱۴۴ پره بود تا استحکام بیشتری پیدا کند، با سرعت کمی می چرخید و دارای جعبه دنده بود [۱-۲].

در توربین های بادی، ژنراتورهای سنکرون روتور سیم پیچی شده (WRS)، سنکرون مغناطیس دایم (PMSG) و آسنکرون تغذیه دوگانه (DFIG) مورد استفاده قرار می گیرند. کنترل توربین های بادی با دو هدف کلی حفاظت و تولید توان قابل قبول برای شبکه برق صورت می گیرد. در ادامه به گوشه ای از تحقیقات انجام شده در خصوص کنترل توربین های بادی پرداخته می شود.

در مرجع [۳] دو روش کنترلی مود لغزشی و کنترل  $H_{\infty}$  جهت کنترل توربین بادی ارائه شده است. نتایج نشان می دهد کنترل کننده مود لغزشی عملکرد بهتری در پاسخ گذرای سیستم دارد. علاوه بر این، در مقایسه با  $H_{\infty}$ ، روش کنترل مود لغزشی منجر به خطای ردیابی کم تر و زمان نشست کمتری می شود. نویسندگان در مرجع [۴] یک استراتژی کنترل ترکیبی پیشنهاد کرده اند به گونه ای که کنترل کننده بازخورد را با کنترل کننده feedforward ترکیب می کند. مقاله [۵] سیستم کنترل مود لغزشی تقویت شده مبتنی بر ولتاژ داخلی (SMRIC) را برای سیستم های غیر خطی چند ورودی چند خروجی (MIMO) در معرض عدم قطعیت ها معرفی می کند. تکنیک توسعه یافته SMRIC امکان کاهش قابل توجهی از پدیده پیچ پیچ در حضور اختلالات را فراهم می کند و در عین حال عملکرد اسمی سیستم را در صورت عدم وجود اختلال، حفظ می کند. در این مقاله تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته با استفاده از رویکرد لیاپانوف انجام می شود. روش پیشنهادی، همگرایی زمان متناهی مسیر سیستم به سطح لغزشی را تضمین می کند و پایداری مجانبی تعادل را فراهم می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که تکنیک پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم های همزمان، عملکرد عالی را نشان می دهد.

در مرجع [۶] استراتژی طراحی کنترل کننده های سرعت براساس روش مود لغزشی مرتبه بالا به منظور حصول اطمینان از عملکرد بهینه توربین باد در حالت های مختلف باد پیشنهاد شده است. در این مقاله با توجه به نتایج شبیه سازی که تقریباً همه حالت های سرعت باد را در برمی گیرد، نشان داده می شود که با توجه به تغییر سرعت باد توسط کنترلر طراحی شده، زاویه پیچ قابل تنظیم است. از این رو، توان خروجی در مقادیر متناظر با سرعت باد حفظ می شود. علاوه بر این، استحکام سیستم تأیید می شود.

مساله کنترل مقاوم توربین بادی در مقاله [۷] در نظر گرفته شده است. مجموعه ای از کنترل کننده ها براساس دو درجه از مدل خطی شده از توربین بادی طراحی شده اند. یک فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین سرعت باد موثر استفاده می شود و سرعت باد تخمین زده شده برای یافتن نقطه عملیاتی توربین باد مورد استفاده قرار می گیرد. در مرجع [۸]، یک استراتژی کنترل چند متغیره جهت تنظیم توان خروجی سیستم تبدیل انرژی متغیر باد پیشنهاد شده است. ویژگی های کنترلر پیشنهادی، مقاومت در برابر عدم قطعیت های پارامتری توربین، نیرومندی با توجه به آشفتگی های خارجی، مقاومت در برابر دینامیک Unmodeled و زمان رسیدن محدود می باشد. در این مقاله کنترلر مد لغزشی مرتبه بالا برای کاهش اثرات چترینگ در گشتاور ایجاد شده، اعمال می شود که می تواند منجر به افزایش تنش مکانیکی به دلیل تغییرات گشتاور قوی شود.

در مرجع [۹]، کاربرد یک سیستم کنترل چند متغیره قوی که برای توربین بادی با سرعت متغیر افقی طراحی شده است، بحث شده است. در این مقاله یک کنترلر  $H_{\infty}$  بر پایه یک مدل خطی که خستگی مکانیکی توربین را کاهش می دهد، طراحی شده است. نویسندگان در مرجع [۱۰] با استفاده از رویکرد نابرابری های ماتریس خطی (LMI)، یک مدل کنترلر پیش بینی (FMPC) مدل فازی ارائه می دهند. نتایج این مقاله از اثربخشی بالای این روش کنترلی حکایت دارد.

مرجع [۱۱] یک سیستم ترکیبی مبتنی بر ذخیره ساز انرژی و ژنراتور القایی (DFIG) برای بهبود واکنش سریع فرکانس از مزارع بادی پیشنهاد می دهد. سیستم ذخیره ساز انرژی (ES) به گونه ای طراحی شده است که یک پاسخ اینرسی مشابه را به عنوان مولد همزمان با مزرعه بادی ارائه دهد. همچنین یک طرح هماهنگ پاسخ مجازی اینرسی برای سیستم DFIG-ES برای ارائه پاسخ فرکانسی در طول

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

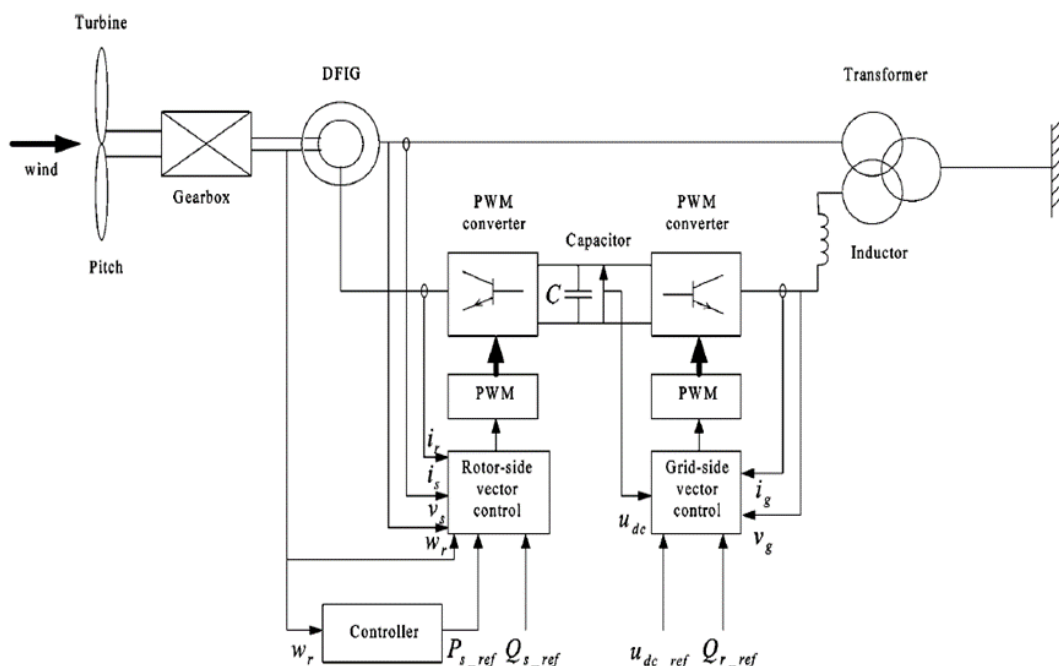
نوسانات فرکانسی پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی بر اساس یک طرح منطق فازی بوده، و می تواند فرکانس های مختلف کاری و نوسانات را بهبود بخشد.

در مرجع [۱۲] تجزیه و تحلیل و کاهش استراتژی رزونانس زیرسنکرون (SSR) برای یک DFIG که به عنوان یک مولد سنکرون مجازی (VSG) عمل می کند، ارائه شده است. از آنجایی که پدیده شبکه ضعیف در اکثر شبکه های برق کنونی برجسته می باشد، روش کنترل VSG در منابع رابط مبدل الکترونیکی مانند DFIG استفاده می شود. بنابراین، یک تجزیه و تحلیل مبتنی بر امیدانس برای توصیف پدیده رزونانس زیر سنکرون برای یک مزرعه بادی مبتنی بر DFIG کنترل شده در حالت VSG متصل به شبکه ارائه شده است. طبق مطالعه صورت گرفته، میرایی توان راکتیو نقش عمده ای در کاهش پدیده SSR در ژنراتورهای بادی DFIG کنترل شده در حالت VSG ایفا می کنند. با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص توربین های بادی در ادامه به شبیه سازی مدهای کنترلی توربین بادی برای دو حالت کاری توربین ها یعنی حالت فوق سنکرون و زیر سنکرون پرداخته شده است.

## ۲. اجزای سیستم تبدیل انرژی بادی DFIG

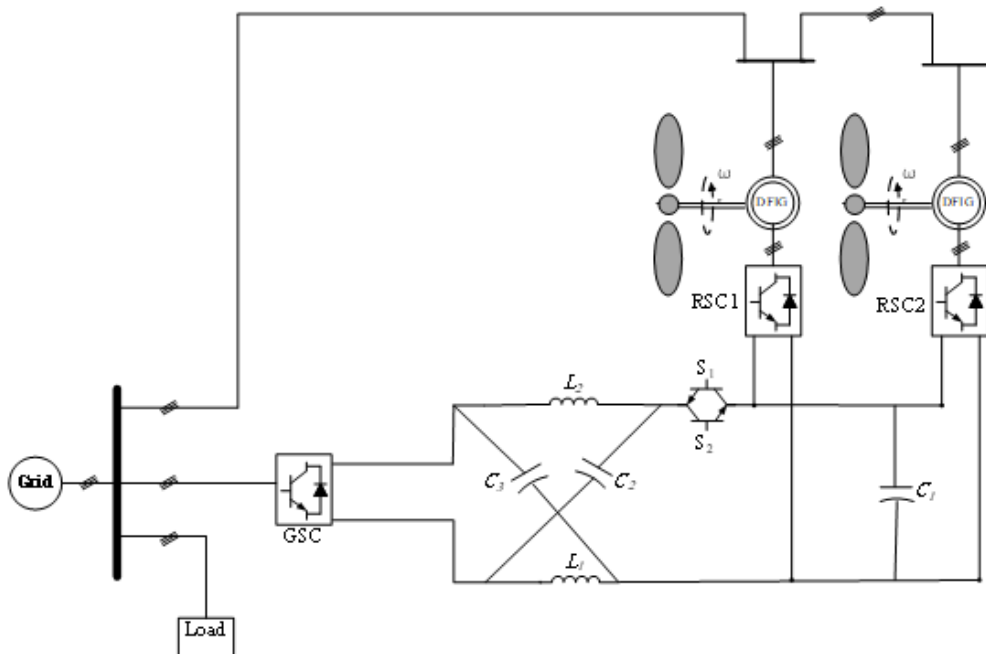
چنانچه در شکل (۱) نشان داده شده است، سیستم DFIG شامل ژنراتور، توربین بادی، سیستم درایو، مبدل سمت روتور (RSC)، مبدل سمت شبکه (GSC)، خازن لینک DC، کنترل کننده زاویه پره و ترانسفورماتور تزویج می باشد. ژنراتور DFIG، یک ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده است که ترمینال های آن به طور مستقیم به شبکه وصل شده و ترمینال های روتور از طریق مبدل فرکانس متغیر AC/DC/AC به شبکه وصل می شوند. توان این مبدل فرکانسی تنها کسری از توان نامی توربین بادی (۲۵ تا ۳۰ درصد) می باشد. سیستم مبدل AC/DC/AC شامل یک مبدل RSC و یک GSC می باشد که به صورت پشت به پشت از طریق خازن لینک DC به هم متصل شده اند. جریان های روتور توسط RSC، برای تغییر گشتاور الکترومغناطیسی یا توان DFIG و تحریک ماشین، کنترل می شوند. از آنجا که مبدل الکترونیک قدرت در حالت توان دو جهته کار می کند. بنابراین سیستم DFIG در هر دو حالت زیر سرعت سنکرون و بالای سرعت سنکرون می تواند کار کند و تولید توان داشته باشد. [13]

ساختار کنترلی در سیستم توربین DFIG، چنانچه در شکل (۱) نشان داده شده است، دارای دو سطح کنترلی می باشد. سطح بالاتر، وظیفه تنظیم سرعت به منظور دریافت توان بهینه از انرژی باد را دارد. این کار توسط سیستم کنترل مکانیکی با تغییر زاویه پره توربین صورت می گیرد. سطح پایین تر، سیستم کنترل الکتریکی، کنترل گشتاور یا توان اکتیو و توان راکتیو می باشد.



شکل ۱. ساختار کنترلی سیستم توربین بادی DFIG [۱۳]

در شکل (۲) سیستم پیشنهادی نشان داده شده است. سیستم از دو توربین بادی DFIG با توان نامی ۲۵۰ کیلووات با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) که به وسیله مبدل منبع امپدانس دوجته به شبکه متصل شده تشکیل شده است. همان طور که مشخص می باشد از دو مبدل سمت روتور و یک مبدل سمت شبکه برای اتصال به شبکه قدرت استفاده شده است. مدار سمت استاتور مستقیماً به شبکه متصل شده و سمت روتور به وسیله دو مبدل پشت‌به‌پشت و منبع امپدانس به شبکه متصل می شود. مقادیر سلف و خازن مبدل منبع امپدانس به ترتیب برابر  $L_1 = L_2 = 0.1mH$  و  $C_2 = C_3 = 1mF$  می باشد. معمولاً برای مبدل های منبع امپدانس دو جهته از یک دیود موازی با کلید برای دوجته بودن انتقال توان استفاده می شود. ولی برای داشتن کنترل بهتر در زمینه انتقال توان بجای دیود از دو کلید موازی با یکدیگر استفاده شده است. کلیدهای به کار گرفته شده از نوع IGBT با مقاومت داخلی ۰/۰۰۱ اهم و ولتاژ فوروارد برابر با  $V_f = 1v$  می باشند. بار از نوع مقاومتی با مقدار ۱۰۰ اهم می باشد. توربین بادی DFIG در دو حالت فوق سنکرون و زیر سنکرون کار می کند. هنگامی که سرعت باد کم است توربین بادی DFIG در حالت زیرسنکرون کار می کند یعنی سرعت روتور کمتر از سرعت نامی است. در این حالت ژنراتور از سمت استاتور به شبکه توان انتقال می دهد و در سمت روتور ژنراتور از شبکه توان می گیرد. در این حالت کلید  $S_2$  برای برقراری توان انتقالی از شبکه به سمت روتور باید روشن باشد و کلید  $S_1$  باید خاموش باشد. هنگامی که سرعت باد زیاد است، توربین بادی DFIG در حالت فوق سنکرون کار می کند که در این حالت سرعت روتور بیشتر از سرعت نامی است و ژنراتور از سمت استاتور و روتور به شبکه توان تزریق می کند، برای این حالت کلید  $S_2$  باید در تمام مدت خاموش باشد.



شکل ۲. سیستم پیشنهادی شامل دو توربین بادی DFIG متصل به شبکه با کمک منبع امپدانس دو جهته

روش کنترلی استفاده شده در سیستم توربین های بادی برای مبدل سمت روتور و شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. در این روش با توجه به مقدار ثابت ولتاژ خازن منبع امپدانس و مقایسه آن با مقدار مرجع و عبور از کنترل کننده PI مقدار جریان مرجع ساخته می شود و سپس با مقدار جریان سلف منبع امپدانس مقایسه و از کنترل کننده جریان PI گذر داده شده و در انتها مقدار  $d_0$  مشخص شده و به سمت مبدل سمت شبکه اعمال می شود.

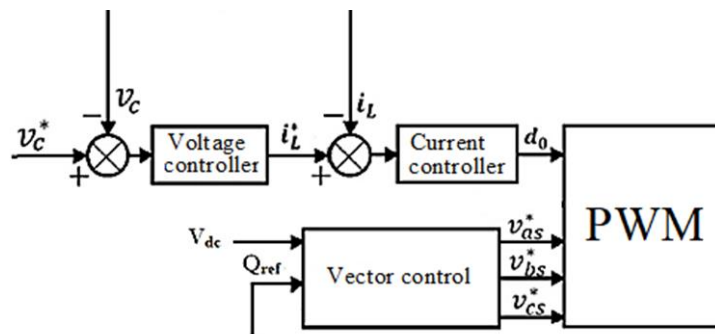
# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

جدول ۱. پارامترهای فنی توربین بادی ۲۵۰kW [۱۴]

پارامتر	مقدار	واحد
دc خازن لینک	۱۰	mF
توان نامی	۲۵۰	kW
ولتاژ نامی	۴۰۰	V(rms)
فرکانس نامی	۵۰	Hz
جریان نامی	۳۷۰	A(rms)
تعداد قطب	۴	---
مقاومت استاتور	۲۰	$\Omega$ m
اندوکتانس نشتی استاتور	۰/۲	mH
مقاومت روتور	۲۰	$\Omega$ m
اندوکتانس نشتی روتور	۰/۲	mH
اندوکتانس مغناطیس کنندگی	۴/۲	mH
ثابت اینرسی	۰/۶۸۵	s



شکل ۳. سیستم کنترل مبدل

## ۱.۳. شبیه سازی

در این قسمت به شبیه سازی سیستم پیشنهادی پرداخته می شود و حالت های مختلف برای آن مورد بررسی قرار می گیرد. شبیه سازی های صورت گرفته با نرم افزار متلب انجام شده است.

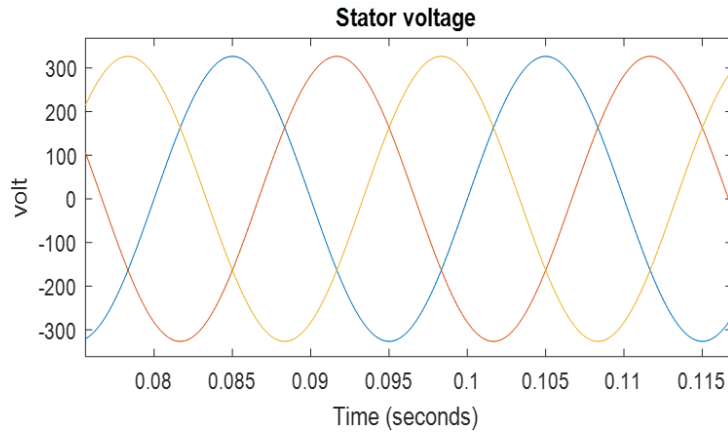
### ۱.۱.۳. حالت اول: عملکرد توربین بادی در حالت فوق سنکرون

در این حالت با توجه به سرعت باد که برابر با ۱۵m/s است سیستم توربین بادی در حالت فوق سنکرون کار می کند در نتیجه کلید S<sub>2</sub> در تمام مدت خاموش است و کلید S<sub>1</sub> فرمان کنترلی همانند عملکرد دیود در منبع امپدانس دارد. شبکه مدنظر دارای ولتاژ ۴۰۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز می باشد. شکل (۴) و (۵) به ترتیب شکل موج های سه فاز ولتاژ و جریان استاتور با مقادیر پیک ۳۲۶ ولت و ۹۵۰ آمپر با فرکانس ۵۰ هرتز را نشان می دهند.

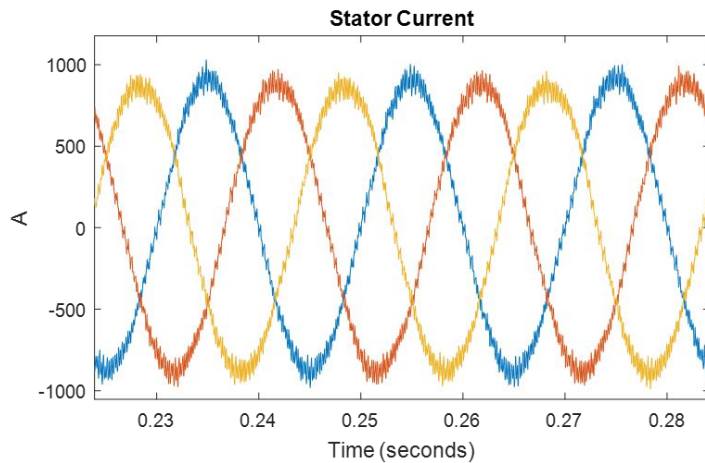
# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

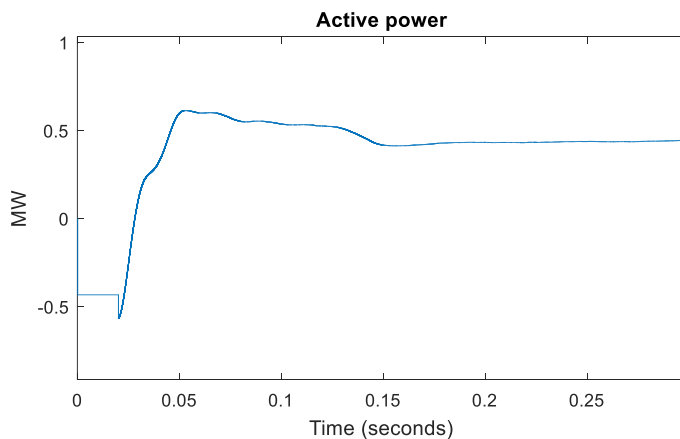


شکل ۴. ولتاژ سه فاز استاتور توربین بادی در حالت عملکرد فوق سنکرون



شکل ۵. جریان سه فاز استاتور توربین بادی در حالت عملکرد فوق سنکرون

شکل (۶) و (۷) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو اندازه گیری شده در حالت فوق سنکرون متعلق به دو توربین بادی را نشان می دهند. جهت تامین حداکثر توان اکتیو مقدار مرجع توان راکتیو در کنترل برداری صفر در نظر گرفته شده است. در صورت نیاز و تقاضای شبکه می توان توان راکتیو نیز از توربین های بادی استخراج کرد ولی در این صورت توان اکتیو کمتری تولید خواهد شد.

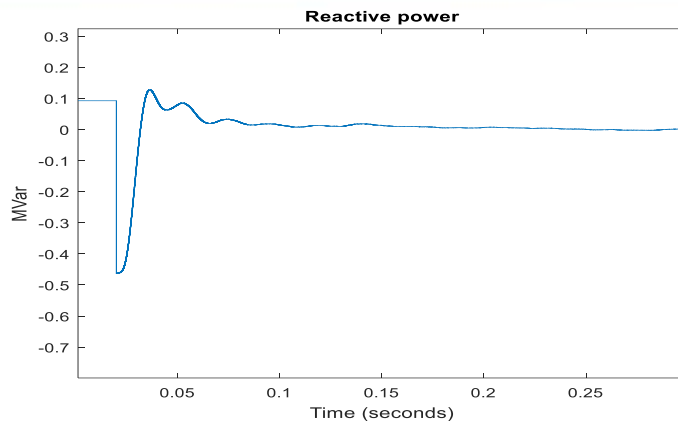


شکل ۶. توان اکتیو اندازه گیری شده توربین بادی در حالت عملکرد فوق سنکرون

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

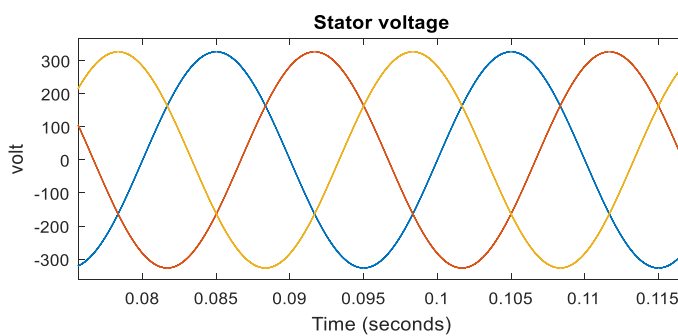
senacnf.ir



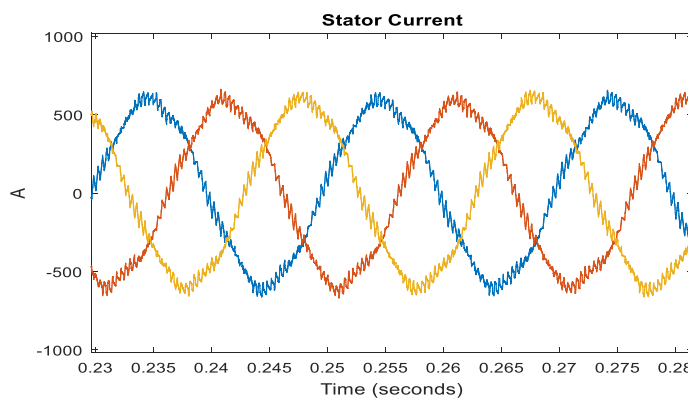
شکل ۷. توان راکتیو اندازه‌گیری شده توربین بادی در حالت عملکرد فوق‌سنکرون

### ۲.۱.۳. حالت دوم: عملکرد توربین بادی در حالت زیرسنکرون

در این حالت با توجه به سرعت باد که برابر با  $10 \text{ m/s}$  است سیستم توربین بادی در حالت زیر سنکرون کار می‌کند در نتیجه برای داشتن عملکرد مناسب کلید  $S_1$  در تمام مدت خاموش و کلید  $S_2$  روشن می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود جهت جریان مبدل‌ها از شبکه به سمت روتور باشد و در این حالت هیچ‌گونه افزایش ولتاژی با کمک مبدل منبع امپدانس اتفاق نمی‌افتد. در این حالت مبدل‌های سمت روتور انرژی را از شبکه دریافت می‌کنند و جهت جریان سمت روتور عکس جهت جریان در حالت فوق سنکرون می‌باشد. شکل (۸) و (۹) به ترتیب شکل موج‌های سه فاز ولتاژ و جریان استاتور را نشان می‌دهند.



شکل ۸. ولتاژ سه فاز استاتور توربین بادی در حالت عملکرد زیرسنکرون



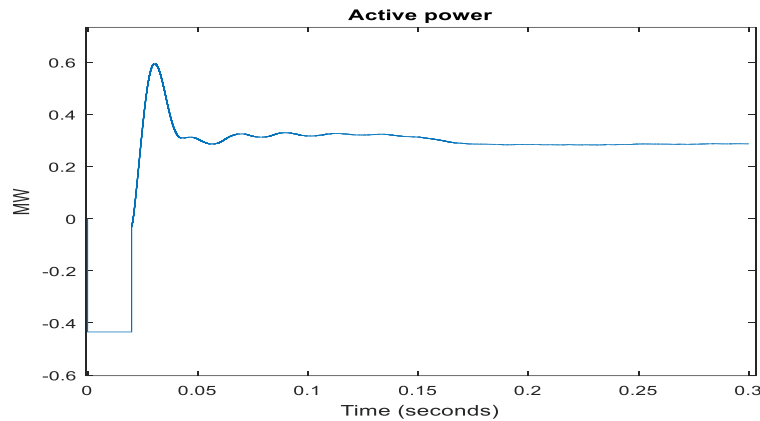
شکل ۹. جریان سه فاز استاتور توربین بادی در حالت عملکرد زیرسنکرون

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

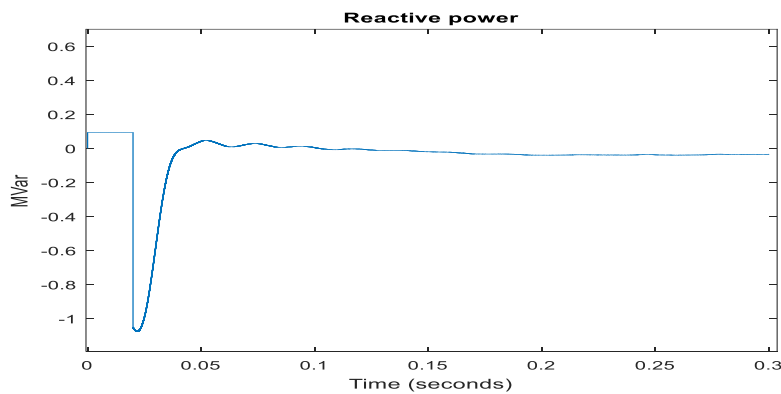
12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده در حالت زیرسنکرون متعلق به دو توربین بادی را نشان می‌دهند. در این حالت نسبت به حالت فوق سنکرون توان کمتری به شبکه تحویل داده می‌شود که به علت سرعت کمتر باد می‌باشد. همچنین مقدار مرجع توان راکتیو برابر با صفر تعیین شده است تا توربین بادی توان اکتیو حداکثری را به شبکه تحویل نماید.



شکل ۱۰. توان اکتیو اندازه‌گیری شده توربین بادی در حالت عملکرد زیرسنکرون



شکل ۱۱. توان راکتیو اندازه‌گیری شده توربین بادی در حالت عملکرد زیرسنکرون

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله مدل سازی و کنترل ژنراتور القایی دوسوتغذیه در حالت متصل به شبکه با کمک منبع امپدانس دو جهت برای دو حالت کاری فوق سنکرون و زیر سنکرون انجام پذیرفت. یک لینک dc مشترک برای توربین های بادی نوع DFIG در نظر گرفته شد. این لینک dc از طریق یک مبدل به شبکه وصل و تثبیت می شود که این موضوع باعث صرفه جویی در تعداد مبدل ها نسبت به توربین های بادی DFIG متعارف می شود. سیستم مدنظر به وسیله کنترل برداری مبدل سمت شبکه و مبدل سمت روتور به طور مناسب کنترل می شوند. نتایج نشان می دهند در حالت سرعت های زیاد باد، توربین بادی برای داشتن عملکرد مناسب باید در حالت فوق سنکرون کار کند، در نتیجه جهت جریان در مبدل ها به سمت شبکه می باشد و در حالتی که سرعت باد کم است توربین بادی باید در حال زیرسنکرون تنظیم شود تا عملکرد مناسبی داشته باشد.

#### منابع

[1] Gipe P, Möllerström E. An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s. Wind Engineering. 2022 Dec;46(6):1973-2004.



# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

- [2] Gipe P, Möllerström E. An overview of the history of wind turbine development: Part II–The 1970s onward. *Wind Engineering*. 2023 Feb;47(1):220-48.
- [3] Nayeh RF, Moradi H, Vossoughi G. Multivariable robust control of a horizontal wind turbine under various operating modes and uncertainties: A comparison on sliding mode and  $H^\infty$  control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020 Feb 1;115:105474.
- [4] Ren H, Zhang H, Deng G, Hou B. Feedforward feedback pitch control for wind turbine based on feedback linearization with sliding mode and fuzzy PID algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018 Jun 20;2018.
- [5] Salihbegovic A. Robust internal-loop compensator based sliding mode control of nonlinear systems in the presence of mismatched disturbances. *IEEE Access*. 2019 Apr 17;7:50492-502.
- [6] Jing Y, Sun H, Zhang L, Zhang T. Variable speed control of wind turbines based on the quasi-continuous high-order sliding mode method. *Energies*. 2017 Oct 17;10(10):1626.
- [7] Mirzaei M, Niemann HH, Poulsen NK. A  $\mu$ -synthesis approach to robust control of a wind turbine. In 2011 50th IEEE conference on decision and control and european control conference 2011 Dec 12 (pp. 645-650). IEEE.
- [8] Tian B, Zong Q, Wang J, Wang F. Quasi-continuous high-order sliding mode controller design for reusable launch vehicles in reentry phase. *Aerospace science and technology*. 2013 Jul 1;28(1):198-207.
- [9] Pinteá A, Christov N, Borne P, Popescu D.  $H^\infty$  controller design for variable speed wind turbines.
- [10] Bououden S, Filali S, Chadli M. Fuzzy predictive control of a variable speed wind turbine. *Energy Procedia*. 2013 Jan 1;42:357-66.
- [11] Tu S, Zhang B, Jin X. Research on DFIG-ES system to enhance the fast-frequency response capability of wind farms. *Energies*. 2019 Sep 19;12(18):3581.
- [12] Jiao Y, Li F, Dai H, Nian H. Analysis and mitigation of sub-synchronous resonance for doubly fed induction generator under VSG control. *Energies*. 2020 Apr 1;13(7):1582.
- [13] Gharedaghi F, Deysi M, Jamali H. A. khalili, "Soft Starter Investigation on Grid Connection of Wind Turbines,". *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011;5(10):1146-53.
- [14] Zhou L, Liu J, Zhou S. Improved demagnetization control of a doubly-fed induction generator under balanced grid fault. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014 Dec 18;30(12):6695-705.