

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های نو

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



## تحلیل اسکن فرکانسی تشدید زیرسنکرون در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه

عباس سلیمانی<sup>۱</sup>، روح‌الامین زینلی داورانی<sup>۲</sup>

کرمان - انتهای اتوبان هفت باغ علوی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

farhadsolaimanielc@gmail.com

### چکیده

طی سال‌های گذشته مزارع بادی نقش مهمی در تأمین انرژی شبکه‌های برق ایفا کرده‌اند. به منظور حفظ پایداری شبکه‌های برق تحلیل عملکرد اجزای آن همچون مزارع بادی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. در این مقاله، تشدید زیرسنکرون در یک مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه متصل به خط انتقال با جبران‌سازی سری تحلیل شده است. این تحلیل با استفاده از روش اسکن فرکانسی صورت گرفته و نتایج بدست آمده با دیگر روش‌های تحلیل همچون روش تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی گذرای الکترومغناطیسی مقایسه شده است. شبیه‌سازی سیستم در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC صورت گرفته است. نتایج این تحلیل حاکی از آن است که مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه متصل به خط انتقال جبران شده با خازن سری در محدوده‌ای از سطوح جبران‌سازی حساس به تشدید زیرسنکرون بوده و لذا تحلیل این پدیده بسیار مهم و ضروری است.

واژه‌های کلیدی: مزرعه بادی، ژنراتور القایی تک قفسه، تشدید زیرسنکرون، اثر ژنراتور القایی، اسکن فرکانسی.

۱- دانشجو

۲- استادیار

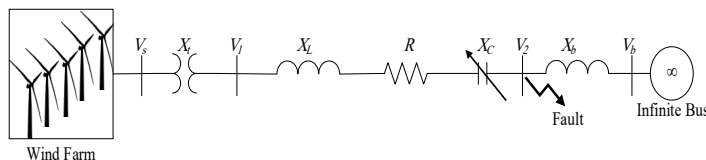


## ۱- مقدمه

در سراسر جهان ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی به سرعت در حال افزایش می‌باشد. پیشرفت فناوری، بهبود طراحی و کاهش هزینه‌ها یک نقش مؤثر در افزایش سطح نفوذ نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت را داشته است. تعداد زیادی از کشورها هدف خود را مبنی بر تولید ۲۰ درصد از انرژی خود توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۰ میلادی قرار داده‌اند که انرژی باد به عنوان عامل اول توسعه مد نظر می‌باشد. همچنین مزارع بادی نقش مهمی در تأمین انرژی شبکه‌های هوشمند ایفا کرده‌اند. به منظور حفظ پایداری شبکه‌های هوشمند تحلیل عملکرد اجزای آن همچون مزارع بادی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد [۱-۲]. حضور مزارع بادی بزرگ در شبکه‌های توزیع و انتقال با چندین چالش جدی روبرو می‌باشد که یکی از این چالش‌ها ارتقای اساسی تأسیسات شبکه انتقال شامل ساخت خطوط جدید برای عبور توان عظیم نیروگاه‌های بادی بزرگ می‌باشد. یکی از روش‌های مؤثر افزایش توان اکتیو عبوری با خطوط انتقال موجود، جبران‌سازی سری می‌باشد [۳-۷]. از این رو، به طور محسوسی مورد توجه نیروگاه‌های بادی قرار گرفته است. خازن سری، علت ایجاد تشدید زیرسکرون در سیستم قدرت شناخته شده است [۵-۱۰]. همچنین حضور خازن‌های سری در خط، امکان تشدید زیرسکرون در توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی را به دنبال دارد [۱۰-۱۲]. تشدید زیرسکرون دارای دو جنبه‌ی مهم تحریک خودی مربوط به اثر ژنراتور القایی و تقویت گشتاور می‌باشد [۱۳-۱۶]. به طور کلی از روش‌های اسکن فرکانسی، تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی گذرای الکترومغناطیسی برای مطالعه تشدید زیرسکرون استفاده می‌شود [۱۲-۲۵]. در [۶] از روش‌های تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی برای مطالعه تشدید زیرسکرون در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه استفاده کرده است. همچنین در [۷] و [۲۰-۲۵] از روش‌های تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی برای مطالعه تشدید زیرسکرون در مزارع بادی استفاده شده است. در [۱۷-۱۹] از روش اسکن فرکانسی برای تحلیل تشدید زیرسکرون استفاده شده است. با توجه به مقالات ارائه شده نتایج حاکی از آن است که تداخل پیچشی در سطوح جبران‌سازی مختلف و ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی اتفاق نمی‌افتد اما اثر ژنراتور القایی در مزارع بادی در سطوح جبران‌سازی بالا مشاهده می‌شود [۱۲-۲۵]. در این مقاله از روش اسکن فرکانسی برای مطالعه تشدید زیرسکرون در مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه استفاده شده و نتایج بدست آمده با سایر روش‌ها نظیر تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی گذرای الکترومغناطیسی مقایسه گردیده است. در این مقاله سطح جبران‌سازی سری بحرانی برای ظرفیت‌های مختلف مزرعه باد از روش‌های تحلیل مقادیر ویژه و اسکن فرکانسی مطالعه و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در قسمت ۲ مقاله، سیستم مورد مطالعه توصیف شده است. در قسمت ۳، جنبه‌های مختلف تشدید زیرسکرون معرفی می‌گردد. در قسمت ۴، روش‌های استفاده شده برای تحلیل تشدید زیرسکرون شرح داده می‌شوند. در قسمت ۵، نتایج اسکن فرکانسی و مقایسه آن با نتایج سایر روش‌ها ارائه می‌گردد. در قسمت ۶، نتیجه‌گیری حاصل از مقاله ارائه خواهد شد.

## ۲- توصیف سیستم

سیستم مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در سیستم مورد مطالعه یک مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه به یک خط انتقال جبران شده سری متصل شده است. به منظور مدل‌سازی، سیستم مورد مطالعه به دو زیر سیستم تقسیم می‌گردد: الف) مزرعه بادی و ب) خط انتقال. خود مزرعه بادی به دو زیر سیستم، سیستم پیچشی مکانیکی و ژنراتور القایی تقسیم می‌گردد. مدل‌سازی کامل زیر سیستم‌ها در [۶]، [۷]، ارائه شده است. اطلاعات قسمت‌های مختلف سیستم نمونه در پیوست آمده است.



شکل ۱- سیستم مورد مطالعه

### ۳- تشدید زیرسنکرون

بنا بر تعریف استاندارد IEEE تشدید زیرسنکرون پدیده‌ای دینامیکی است که تحت آن شرایط، شبکه الکتریکی مقدار زیادی انرژی با واحد توربین-ژنراتور در یک یا چند فرکانس پایین‌تر از فرکانس سنکرون مبادله می‌کند. این تعریف شامل تمام شرایط سیستم می‌شود که فرصت تبادل انرژی در فرکانس‌های زیرسنکرون را به وجود می‌آورد. عمده‌ترین شرایطی که سبب وقوع تشدید زیرسنکرون می‌شوند، عبارت‌اند از اثر خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی، تداخل پیچشی و تقویت گشتاور گذرا. پدیده تشدید زیر سنکرون بطور عمده در سیستم‌های انتقال جبران شده با خازن سری رخ می‌دهد؛ که عملاً جبران‌سازی باعث ایجاد جریان‌هایی پایین‌تر از فرکانس سنکرون با فرکانس طبیعی خط ( $f_{er}$ ) می‌شود که در رابطه‌ی ۱ نشان داده شده است. با توجه به رابطه‌ی ۱ از آنجایی که  $X_c$  (راکتانس خازن سری) از  $X_N$  (راکتانس خط) کوچک‌تر می‌باشد بنابراین  $f_{er}$  (فرکانس طبیعی خط) از  $f_0$  (فرکانس نامی سیستم) کوچک‌تر می‌باشد. به همین دلیل است که آن را فرکانس زیرسنکرون می‌نامند. جریان ایجاد شده با فرکانس  $f_r$  (فرکانس مکمل) در روتور ناشی از همین جریان‌های زیرسنکرون می‌باشند.  $f_r$  در رابطه‌ی ۲ آورده شده است.

$$f_{er} = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_N}} \quad (1)$$

$$f_r = f_0 \pm f_{er} \quad (2)$$

### ۳-۱- اثر ژنراتور القایی

اگر به هر دلیلی یکی از نوسانات پیچشی روتور تحریک شود، شفت توربین-ژنراتور علاوه بر چرخش با سرعت نامی خود یک حرکت پیچشی نیز خواهد داشت. در چنین شرایطی علاوه بر فرکانس نامی ماشین، فرکانس دیگری نیز در جریان ژنراتور وجود خواهد داشت که به دلیل تفاوت با فرکانس نامی، اثر ژنراتور القایی پدید می‌آید. اثر ژنراتور القایی پدیده‌ای کاملاً الکتریکی بوده و در صورتی سیستم ناپایدار می‌شود که اندازه مقاومت (منفی) ژنراتور، از مقاومت (مثبت) شبکه بیشتر شود. طبق رابطه‌ی ۳ با توجه به اینکه  $f_m$  از  $f_{er}$  کوچک‌تر است پس مقدار لغزش ( $S_{SSF}$ ) منفی خواهد بود. با منفی بودن مقدار لغزش، مقاومت مشاهده شده از ترمینال ژنراتور برای جریان‌های زیرسنکرون منفی خواهد بود. حال اگر اندازه این مقاومت از مجموع مقاومت‌های شبکه بیشتر باشد، مقاومت مجموع سیستم منفی خواهد شد که باعث رشد جریانات استاتور می‌گردد. این پدیده را اثر ژنراتور القایی می‌نامند.

$$S_{SSF} = \frac{f_{er} - f_m}{f_{er}} \quad (3)$$



### ۳-۲- تداخل پیچشی

اگر مکمل فرکانس طبیعی شبکه نزدیک به یکی از فرکانس‌های پیچشی سیستم محور توربین-ژنراتور باشد، ممکن است نوسان‌های پیچشی تحریک شوند. تحت چنین شرایطی، ولتاژ کوچک القایی ناشی از نوسان‌های روتور ممکن است به جریان‌های زیرسنکرون بزرگی ختم شود. این جریان مولفه‌های نوسانی در گشتاور روتور تولید می‌کند که فاز آن به گونه‌ای است که نوسان روتور را زیادتر می‌کند. هنگامی که این گشتاور از گشتاور ناشی از میرایی مکانیکی بزرگ‌تر باشد، سیستم الکترومکانیکی شاهد نوسان‌های افزایشی خواهد بود و کاهش طول عمر شفت توربین-ژنراتور و حتی شکسته شدن آن را به دنبال خواهد داشت.

### ۳-۳- تقویت گشتاور

این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که عیبی در سیستم جبران شده سری خازنی روی داده و سپس برطرف شود که منجر به ذخیره شدن مقدار زیادی انرژی در بانک‌های خازنی می‌گردد. بانک‌های خازنی انرژی ذخیره شده را به فرم جریان‌های زیرسنکرون توسط ژنراتور تخلیه می‌کنند. در حالتی که فرکانس مکمل این جریان‌ها با فرکانس طبیعی محور ژنراتور یکی باشد نوسانات ممکن است خیلی سریع زیاد شده و در مدت زمان کمی (۱/۰ ثانیه) به سطح مخرب برسند.

### ۴- روش مطالعه تشدید زیرسنکرون

از روش‌های مطالعه تشدید زیرسنکرون می‌توان به (۱) اسکن فرکانسی، (۲) تحلیل مقادیر ویژه و (۳) شبیه‌سازی گذرای الکترومغناطیسی اشاره کرد. این روش‌ها در ادامه توضیح داده می‌شوند.

#### ۴-۱- اسکن فرکانسی

یکی از روش‌های آسان و سریع برای مطالعه تشدید زیرسنکرون روش اسکن فرکانسی می‌باشد. از این روش برای بررسی اثر ژنراتور القایی استفاده می‌شود. اگر چه ممکن است اطلاعاتی در رابطه با تداخل پیچشی و گشتاور گذرا نیز در اختیار ما قرار دهد. خروجی برنامه، امپدانس مشاهده شده به صورت تابعی از فرکانس با توجه به شبکه، از نقطه‌ای پشت سیم‌پیچ‌های روتور ژنراتور مورد مطالعه می‌باشد. به این امپدانس، امپدانس زیرسنکرون می‌گویند. طبق این روش اثر ژنراتور القایی در صورت وجود مقاومت معادل منفی در فرکانس زیرسنکرونی که راکتانس معادل صفر یا نزدیک به صفر باشد رخ می‌دهد. نوسانات الکتریکی ممکن است به تجهیزات سیستم الکتریکی آسیب جدی برساند اما با این وجود نمی‌تواند باعث نامیرا شدن نوسانات گشتاور شفت شود.

#### ۴-۲- تحلیل مقادیر ویژه

اکثر سیستم‌های واقعی از جمله سیستم قدرت ذاتاً غیرخطی هستند، برای تحلیل سیستم‌های غیرخطی روش منسجمی وجود ندارد و روش‌های موجود برای سیستم‌هایی خاص و در شرایط خاص به کار برده می‌شوند. ساده‌ترین روش تحلیل یک سیستم غیرخطی بهره‌گیری از تحلیل خطی آن سیستم در حول نقطه کار با استفاده از تحلیل سیگنال کوچک یا تحلیل مُدال می‌باشد. این روش به طور گسترده‌ای در تحلیل پایداری سیستم قدرت به کار برده می‌شود. حوزه‌های کاربردی این روش شامل



پایداری نوسانات فرکانس پایین و پایداری تشدید زیرسنکرون می‌باشد. استفاده از یک مدل خطی و نتایج حاصل از این تقریب در اکثر مواقع رضایت‌بخش است. مدل ریاضی خطی شده سیستم را می‌توان به فرم معادلات دیفرانسیل و جبری رابطه‌ی ۴ نوشت. با استفاده از معادلات دیفرانسیل هر زیر بخش سیستم مورد مطالعه، فضای حالت خطی سیستم از طریق آنالیز مودال خطی محاسبه می‌گردد و مقادیر ویژه سیستم محاسبه می‌شود. در تحلیل تشدید زیرسنکرون، مقادیر ویژه مرتبط با اثر ژنراتور القایی و تداخل پیچشی بررسی می‌شوند. این مقادیر ویژه را با نام مدهای زیرسنکرون و پیچشی می‌شناسند. رابطه‌ی ۵ یک جفت از مقادیر ویژه سیستم را نشان می‌دهد؛ که قسمت حقیقی متناسب با میرایی و قسمت موهومی نشان دهنده فرکانس نوسانات می‌باشد. در رابطه‌ی ۶ با تشدید زیرسنکرون، قسمت حقیقی مقادیر ویژه مرتبط با مدهای پیچشی بیانگر شدت تداخل پیچشی می‌باشد و قسمت حقیقی مقادیر ویژه مرتبط با فرکانس‌های تشدید سیستم الکتریکی (مدهای زیرسنکرون) بیانگر شدت اثر ژنراتور القایی می‌باشد. در روابط ۴، ۵ و ۶،  $X$  بردار متغیر حالت،  $Y$  بردار خروجی و  $U$  بردار ورودی،  $\sigma$  قسمت‌های حقیقی و  $\omega$  موهومی می‌باشند. همچنین،  $\zeta$  نسبت میرایی و  $f$  فرکانس نوسانات مدهای نوسانی را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (6)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

#### ۴-۳- شبیه‌سازی گذرای الکترومغناطیسی

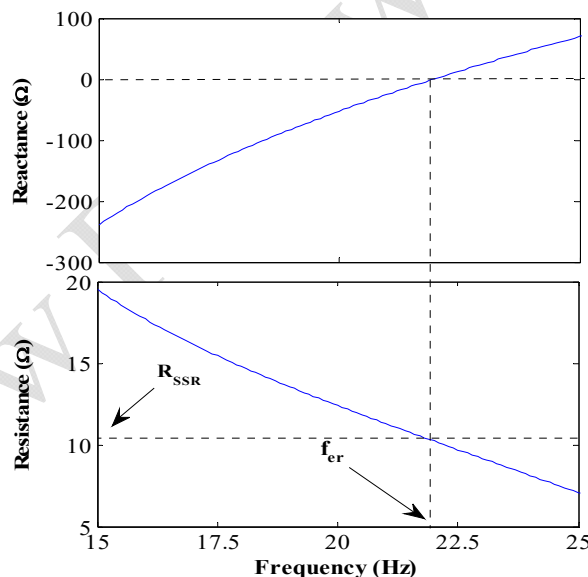
نرم‌افزار PSCAD/EMTDC یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه مطالعات گذرا می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان نتایج حاصل از تحلیل سیگنال کوچک را تأیید و اضافه‌گشتاورهای ناشی از تشدید زیرسنکرون در لحظه خطا یا کلیدزنی تجهیزات در خط انتقال جبران شده با خازن سری را تعیین نمود. استفاده از تحلیل تبدیل فوریه سریع برای شکل‌های موج شبیه‌سازی شده در حوزه زمان می‌تواند اطلاعات مفیدی از قبیل فرکانس نوسانات و دامنه آنها را در اختیار ما قرار دهد. ناپایداری در شکل موج گشتاور الکتریکی ژنراتور در شبیه‌سازی گویای ناپایداری در مد زیرسنکرون می‌باشد که مربوط به اثر ژنراتور القایی است. ناپایداری در شکل موج گشتاورهای اعمالی به شفت ژنراتور نشان دهنده ناپایداری در مدهای پیچشی می‌باشد که ناشی از تداخل پیچشی است.

#### ۵- تحلیل تشدید زیرسنکرون در سیستم مورد مطالعه

نتایج مطالعه‌ی انجام شده بر روی تشدید زیرسنکرون با روش اسکن فرکانسی در این قسمت ارائه شده است. همچنین نتایج بدست آمده با نتایج شبیه‌سازی سیستم و تحلیل مقادیر ویژه مقایسه شده و نتایج حاصل از اسکن فرکانسی را تأیید می‌کند. شکل ۲ بیانگر مطالعه‌ی انجام شده بر روی مزرعه بادی ۱۰۰ مگاوات با جبران‌سازی ۵۰ درصد می‌باشد. با توجه به این



شکل مشاهده می‌شود که فرکانسی که در آن راکتانس زیرسنکرون صفر شده، بیانگر فرکانس طبیعی خط ( $f_{er}$ ) بوده و مقاومت زیرسنکرون متناظر با این فرکانس را مقاومت تشدید زیرسنکرون ( $R_{SSR}$ ) می‌نامیم. در اینجا مقاومت تشدید زیرسنکرون مثبت بوده و مقدار آن تقریباً برابر با  $10/225$  اهم می‌باشد. می‌توان این نتیجه را گرفت که به دلیل مثبت بودن مقاومت، اثر ژنراتور القایی رخ نخواهد داد و سیستم پایداری خود را حفظ خواهد کرد. نتایج اسکن فرکانسی برای جبران‌سازی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد به ترتیب در جدول ۱، ۲ و ۳ آمده است. اطلاعات جدول شامل فرکانس طبیعی خط، فرکانس مکمل زیرسنکرون و مقاومت تشدید زیرسنکرون در مزرعه بادی با ظرفیت ۱۰۰ تا ۵۰۰ مگاوات می‌باشد. با توجه به نتایج جدول‌ها مشاهده می‌شود که در مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه با افزایش سطح جبران‌سازی از ۴۰ تا ۶۰ درصد، مقاومت کم شده اما همچنان سیستم پایداری خود را حفظ می‌کند. در جدول ۴ مد زیرسنکرون سیستم مورد مطالعه که مرتبط با اثر ژنراتور القایی می‌باشد، از تحلیل مقادیر ویژه برای ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی به ازای سطوح جبران‌سازی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد نشان داده شده است. نتایج تحلیل مقادیر ویژه، نتایج بدست آمده از اسکن فرکانسی را تأیید می‌کند؛ بنابراین در همه ظرفیت‌ها با افزایش سطح جبران‌سازی سری میرایی مد زیرسنکرون کاهش می‌یابد (همان‌طور که قبلاً گفته شد شاخص پایداری در اسکن فرکانسی مقاومت تشدید زیرسنکرون و در مقادیر ویژه میرایی مد زیرسنکرون می‌باشد). در شکل ۳ مقاومت تشدید زیرسنکرون در یک مزرعه بادی با ظرفیت ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات متصل به خط انتقال جبران شده با خازن سری با سطح ۵۰ درصد از طریق اسکن فرکانسی محاسبه و نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا با افزایش ظرفیت مزرعه بادی، مقاومت تشدید زیرسنکرون کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



شکل ۲- اسکن فرکانسی مزرعه بادی ۱۰۰ مگاوات

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

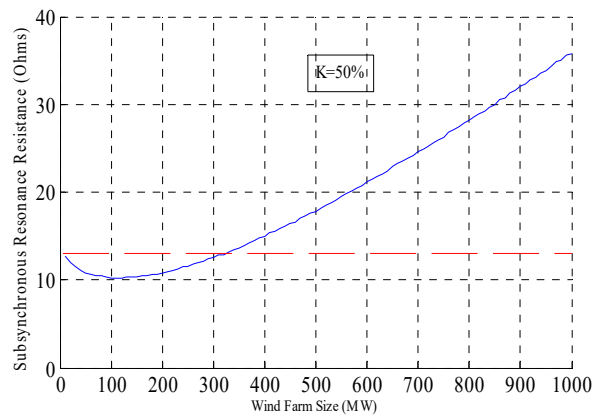
دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های نو

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Renewenergy.ir



شکل ۳- مقاومت تشدید زیرسنکرون در ظرفیت‌های مختلف مزرعه بادی

جدول ۱- نتایج اسکن فرکانسی برای جبران‌سازی سری ۴۰ درصد

مقاومت تشدید زیرسنکرون (Ω)	فرکانس کامل زیر سنکرون (rad/s)	فرکانس طبیعی خط (rad/s)	ظرفیت مزرعه بادی (MW)
۱۱/۸۹۱	۲۵۳/۲۲۱	۱۲۳/۷۷۸	۱۰۰
۱۳/۶۵۱	۲۲۲/۴۳۴	۱۵۴/۵۶۶	۲۰۰
۱۶/۴۵۰	۲۰۵/۴۷۲	۱۷۱/۵۳۰	۳۰۰
۱۹/۷۲۸	۱۹۴/۱۶۵	۱۸۲/۸۴۰	۴۰۰
۲۳/۳۲۴	۱۸۵/۹۹۲	۱۹۱/۰۰۸	۵۰۰

جدول ۲- نتایج اسکن فرکانسی برای جبران‌سازی سری ۵۰ درصد

مقاومت تشدید زیرسنکرون (Ω)	فرکانس کامل زیرسنکرون (rad/s)	فرکانس طبیعی خط (rad/s)	ظرفیت مزرعه بادی (MW)
۱۰/۲۲۵	۲۳۸/۷۶۹	۱۳۸/۲۳۰	۱۰۰
۱۰/۷۶۰	۲۰۴/۲۱۲	۱۷۲/۷۸۷	۲۰۰
۱۲/۵۵۸	۱۸۵/۳۶۲	۱۹۱/۶۳۷	۳۰۰
۱۴/۹۴۱	۱۷۲/۷۹۶	۲۰۴/۲۰۳	۴۰۰
۱۷/۸۱۹	۱۶۴/۰۰۱	۲۱۲/۹۱۹	۵۰۰

جدول ۳- نتایج اسکن فرکانسی برای جبران‌سازی سری ۶۰ درصد

مقاومت تشدید زیرسنکرون (Ω)	فرکانس کامل زیرسنکرون (rad/s)	فرکانس طبیعی خط (rad/s)	ظرفیت مزرعه بادی (MW)
۸/۶۲۷	۲۲۶/۲۰۴	۱۵۰/۷۹۶	۱۰۰
۷/۸۷۶	۱۸۸/۵۰۵	۱۸۸/۴۹۵	۲۰۰
۸/۴۷۱	۱۶۷/۷۶۹	۲۰۹/۲۳۰	۳۰۰
۹/۷۳۹	۱۵۳/۹۴۶	۲۲۳/۰۵۳	۴۰۰

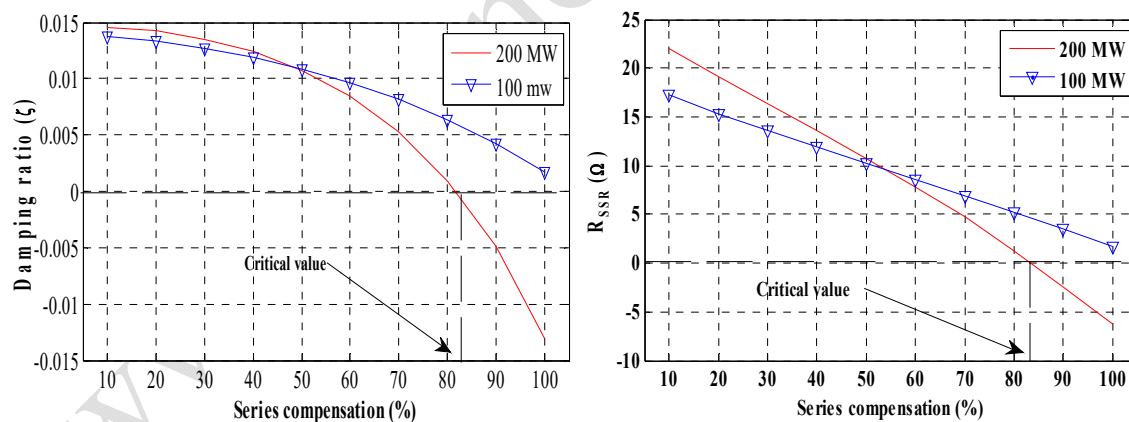


۱۱/۷۰۴	۲۳۲/۴۷۷	۲۳۲/۴۷۷	۵۰۰
--------	---------	---------	-----

جدول ۴- نتایج تحلیل مقادیر ویژه برای مد زیرسنکرون در جبران‌سازی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد

ظرفیت مزرعه بادی (MW)	جبران‌سازی ۴۰٪	جبران‌سازی ۵۰٪	جبران‌سازی ۶۰٪
۱۰۰	-۳/۰۰۴ ± ۲۵۲/۶۷	-۲/۵۹۳ ± ۲۳۸/۲۰	-۲/۱۷۵ ± ۲۲۵/۱۷
۲۰۰	-۲/۷۴۷ ± ۲۲۱/۴۴	-۲/۱۸۷ ± ۲۰۳/۳۷	-۱/۵۸۰ ± ۱۸۵/۰۹
۳۰۰	-۲/۷۶۴ ± ۲۰۴/۱۶	-۲/۱۳۱ ± ۱۸۴/۰۴	-۱/۴۱۱ ± ۱۶۵/۹۰
۴۰۰	-۲/۸۶۷ ± ۱۹۲/۹۶	-۲/۲۰۱ ± ۱۷۱/۴۸	-۱/۴۱۴ ± ۱۵۲/۰۷
۵۰۰	-۲/۹۹۷ ± ۱۸۵/۰۳	-۲/۳۲ ± ۱۶۲/۵۸	-۱/۴۹۷ ± ۱۴۲/۲۵

شکل ۴ مقاومت تشدید زیرسنکرون و نسبت میرایی مد زیرسنکرون برای مزرعه بادی ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاوات با سطوح جبران‌سازی مختلف از ۱۰ تا ۱۰۰ درصد را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، افزایش سطح جبران‌سازی سری باعث کاهش مقاومت تشدید زیرسنکرون و نسبت میرایی مد زیرسنکرون شده و در مزرعه بادی ۲۰۰ مگاوات از یک سطح جبران‌سازی به بعد وارد ناحیه ناپایدار می‌شود که اصطلاحاً سطح جبران‌سازی سری بحرانی نامیده می‌شود. سطح جبران‌سازی سری بحرانی در ظرفیت‌های مختلف مزرعه باد با استفاده از روش اسکن فرکانسی و تحلیل مقادیر ویژه بدست آمده و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از این دو روش کاملاً به هم نزدیک می‌باشد.



شکل ۴- مقاومت تشدید زیرسنکرون و نسبت میرایی مد زیرسنکرون

جدول ۵- سطح جبران‌سازی سری بحرانی

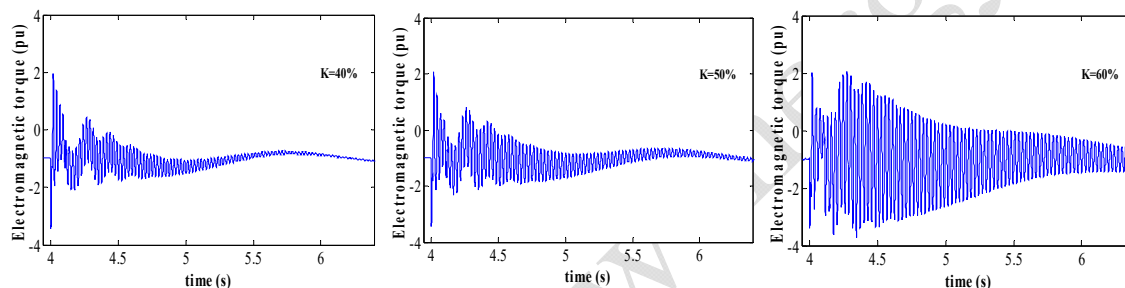
ظرفیت مزرعه بادی (MW)	اسکن فرکانسی	تحلیل مقادیر ویژه
۱۰۰	۱۰۶/۳۶۹۸	۱۰۵/۷۹۹۵
۲۰۰	۸۱/۸۱۷۲	۸۱/۶۵۲۶



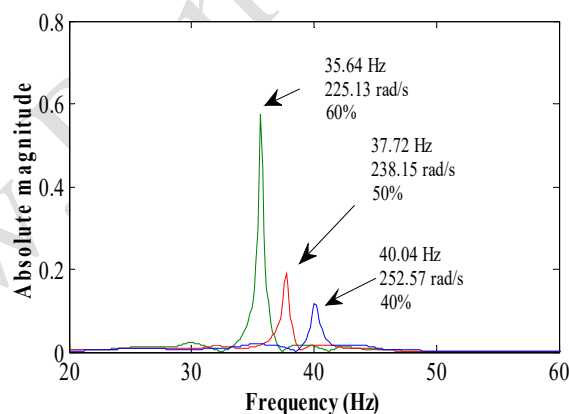


۷۵/۳۰۲۶	۷۶/۹۹۵۹	۳۰۰
۷۳/۲۷۱۶	۷۴/۵۶۹۸	۴۰۰
۷۲/۷۱۱۱	۷۲/۱۴۷۶	۵۰۰

در شکل ۵ و ۶ به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی و محتوای فرکانسی آنها در جریان‌سازی‌های مختلف نشان داده شده است. شبیه‌سازی مورد نظر برای مزرعه بادی ۱۰۰ مگاوات با جریان‌سازی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد می‌باشد. مطالعه‌ی انجام شده در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC برای یک خطا در باس بینهایت در زمان ۴ ثانیه و رفع آن در ۶ سیکل شبیه‌سازی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، نتایج حاصل از تحلیل اسکن فرکانسی و تحلیل سیگنال کوچک اعم از وضعیت پایداری و فرکانس نوسانات را به خوبی تأیید می‌کند.



شکل ۵- گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور القایی تک قفسه در جریان‌سازی‌های مختلف



شکل ۶- مؤلفه‌ی فرکانسی گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور القایی تک قفسه در جریان‌سازی‌های مختلف

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تحلیل اسکن فرکانسی از مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه متصل به خط انتقال جریان شده با خازن سری ارائه گردید. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد در مزرعه باد مبتنی بر ژنراتور القایی تک قفسه در سطوح



جبران‌سازی واقعی هیچ‌گونه اثر ژنراتور القایی رخ نداده و سیستم پایداری خود را حفظ خواهد کرد. نتایج نشان می‌دهد افزایش سطح جبران‌سازی باعث کاهش مقاومت تشدید زیرسنکرون شده اما ناپایداری رخ نخواهد داد؛ اما در سطوح جبران‌سازی بالا مقاومت تشدید زیرسنکرون منفی شده و در نتیجه سیستم ناپایدار می‌گردد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش ظرفیت مزرعه بادی، ابتدا مقاومت تشدید زیرسنکرون کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در این مقاله نتایج اسکن فرکانسی با سایر روش‌های متداول تحلیل تشدید زیرسنکرون همچون روش تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی در حوزه زمان مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از این روش‌ها، نتایج اسکن فرکانسی اعم از وضعیت پایداری و فرکانس نوسانات را به خوبی تأیید می‌کند.

## پیوست

جدول ۶: اطلاعات سیستم مورد مطالعه

توربین بادی ۲/۳ مگاوات		ژنراتور القایی تک قفسه ۲/۳ مگاوات	
۴	اینرسی توربین بادی	۲/۳ مگاوات	توان نامی
۰/۵	اینرسی ژنراتور	۶۹۰ ولت	ولتاژ نامی
۰/۳	سختی بین توربین بادی و ژنراتور	۶۰ هرتز	فرکانس نامی
۰	میرایی بین توربین بادی و ژنراتور	۰/۰۰۵۶۰۴	مقاومت استاتور
	خط انتقال	۰/۱۰۹۸	راکتانس استاتور
۸۹۲/۴	توان مینا (مگا ولت آمپر)	۰/۰۰۷۲	مقاومت روتور
۵۰۰	ولتاژ مینا (کیلو ولت)	۰/۱۰۱۵	راکتانس روتور
۰/۱۴	راکتانس ترانس	۳/۲۳۶۶	راکتانس مغناطیس کننده
۰/۰۲	مقاومت خط انتقال	-	-
۰/۰۶	راکتانس باس بینهایت	-	-
۰/۵۰	راکتانس خط انتقال	-	-

## مراجع

- [1] <http://www.energynautics.com>
- [2] <http://www.thewindpower.net>
- [3] A. Ackerman, "Wind power in power systems," (John Wiley and Sons, New York, 2005).
- [4] "Global wind energy outlook," <http://www.gwec.net/>, accessed Oct. 2014.
- [5] A. Lara, J. Ekanayake, and C. Huges, "Wind energy generation modeling and control," (John Wiley and Sons, Chichester, U.K., 2009).
- [6] A. Moharana, R.K. Varma, "Subsynchronous resonance in single cage self-excited-induction-generator-based wind farm connected to series-compensated lines," IET Gener. Transm. Distrib., 2011, vol. 5, no. (12), pp. 1221-1232.
- [7] A. Moharana, and R.K. Varma, "SSR in Double-Cage induction-generator-based wind farm connected to series-compensated Transmission line," IEEE Trans. Power Syst., 2013, vol. 28, no. (3), pp. 2573-2583.
- [8] P. Pourbeik, R.J. Koessler, D.L. Dickmader, and W. Wong, "Integration of Large Wind Farms into Utility Grids (Part 2 - Performance Issues)," Proc. IEEE PES General Meeting, Toronto, Canada, 13-17 July 2003, pp. 1520-1525.
- [9] M. Henderson, D. Bertagnolli, and D. Ramey, "Planning HVDC and FACTS in New England," Proc. IEEE/PES PSCE, Seattle, WA, USA, 15-18 March 2009, pp. 1-3.
- [10] "Southern Alberta transmission reinforcement needs identification document," <http://www.aeso.ca/>, accessed Dec. 2008
- [11] P. Kundur, "Power system stability and control," (Tata McGraw-Hill, New York, 1994).
- [12] K. Padiyar, "Analysis of subsynchronous resonance in power system," (Kluwer Academic, 1999)
- [13] P.M. Anderson, and R.G. Farmer, "Series Compensation of Power Systems," California: PBLSH Publication, 1996.

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های نو

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

[www.Renewenergy.ir](http://www.Renewenergy.ir)



- [14] P.M. Anderson, B.L. Agrawal, and J.E. Van Ness, "Subsynchronous Resonance in Power Systems," New York: IEEE Publication, 1990.
- [15] IEEE committee report, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1977, vol. 96, no. 5, pp. 1565- 1572.
- [16] IEEE Committee Report, "Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, vol. 104, no. 6, pp. 1326-1334.
- [17] N. Johansson, L. Angquist and H.P. Nee, "A Comparison of Different Frequency Scanning Methods for Study of Subsynchronous Resonance," IEEE Trans. On Power Systems, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 356-363.
- [18] B.L. Agrawal and R.G. Farmer, "Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, vol. 98, no. 2, pp. 341-349.
- [19] M. El-Marsafawy, "Use of frequency-scan techniques for subsynchronous resonance analysis of a practical series-capacitor compensated AC network," IEE Proc. C Generation, Transmission and Distribution, 1983, vol. 130, no. 1, pp. 28-40.
- [20] A. Ostadi, A. Yazdani, and R.K. Varma, "Modeling and Stability Analysis of a DFIG-Based Wind-Power Generator Interfaced With a Series-Compensated Line," IEEE Trans. Power Deliv., 2009, vol. 24, no. 3, pp. 1504-1514.
- [21] L. Fan, C. Zhu, Z. Miao, and M. Hu, "Modal Analysis of a DFIG-Based Wind Farm Interfaced With a Series Compensated Network," IEEE Trans. Energy Convers., 2011, vol. 26, no. 4, pp. 1010-1020.
- [22] H.A. Mohammadpour, and E. Santi, "Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: Definitions and problem identification — Part I," Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, P.A., U.S.A., 14-18 September 2014, pp. 812-819.
- [23] A. Moharana, and R.K. Varma, "SSR Alleviation by STATCOM in Induction-Generator-Based Wind Farm Connected to Series Compensated Line," IEEE Trans. Sustain. Energy, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 947-957.
- [24] H.A. Mohammadpour, A. Ghaderi, and E. Santi, "Analysis of sub-synchronous resonance in doubly-fed induction generator-based wind farms interfaced with gate – controlled series capacitor," IET Gener. Transm. Distrib., 2014, vol. 8, no. 12, pp. 1998-2011.
- [25] A.E. Leon, J.M. Mauricio, and J.A. Solsona, "Subsynchronous resonance mitigation using variable speed wind energy conversion systems," IET Gener. Transm. Distrib., 2013, vol. 7, no. 5, pp. 511-525.