

## تحلیل و میرا نمودن نوسانات ناشی از مد SSR در مزارع بادی دارای DFIG با کنترل ولتاژ استاتور در شرایط حفظ MPPT

علی اکبر مطیع بیرجندی<sup>۱</sup>، استادیار؛ داود فاتح<sup>۲</sup>، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - Motiebirjandi@sru.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - D.fateh@sru.ac.ir

**چکیده:** پدیده تشدید زیر سنکرون (SSR) حالتی است که نیروگاه بادی در یک یا چند فرکانس زیر سنکرون با شبکه الکتریکی انرژی مبادله می‌کند. در صورت عدم جلوگیری، این پدیده موجب خساراتی به سیستم می‌شود. پدیده SSR ناشی از دو اثر مولد القایی و اثر تداخل پیچشی است. SSR در مزارع بادی با DFIG به دلیل اثر مولد القایی روی می‌دهد. در این تحقیق با کنترل ولتاژ استاتور، به تضعیف و یا پیشگیری از SSR با در نظر گرفتن حفظ شرایط MPPT پرداخته شده است. به طوری که با کنترل مستقیم ولتاژ استاتور، به صورت غیرمستقیم جریان خط سیستم کنترل شده و از اثر مولد القایی جلوگیری به عمل آمده است. برای این منظور از یک کنترلر اضافی به نام کنترلر میرا کننده SSR استفاده شده است. این کنترلر به مبدل GSC ژنراتور دو سو تغذیه اعمال شده است. به دلیل این که SSR به سرعت و فرکانس روتور ژنراتور وابسته است، سرعت روتور به عنوان سیگنال ورودی به این کنترلر انتخاب گردیده است. به منظور شبیه‌سازی، نرم‌افزار SIMULINK/MATLAB به کار گرفته شده و برای تصدیق روش، مزرعه بادی با DFIG در نظر گرفته شده است که با خط انتقال جبران شده سری خازنی به شین بی‌نهایت متصل است.

**واژه‌های کلیدی:** SSR، DFIG، کنترلر میرا کننده SSR، اثر مولد القایی، کنترل ولتاژ.

## Analysis and Damp of Oscillations Caused by SSR Mode in DFIG Based Wind Farm by Controlling of Stator Voltage in Conditions of Maintaining MPPT

Ali Akbar Motiebirjandi<sup>1</sup>, Assistant professor, Davood Fateh<sup>2</sup>, PhD student

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: Motiebirjandi@srttu.edu

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: D.fateh@srttu.edu

**Abstract:** The subsynchronous resonance (SSR) phenomenon is a condition that the wind farm exchanges energy with the electrical network at one or more of the subsynchronous frequencies. If it is not prevented, this phenomenon causes damages to the system. The SSR phenomenon occurs in two following conditions: Induction generator effect and Torsional interaction effect. The SSR occurs in the DFIG based wind farms due to the induction generator effect. In this research, by controlling the stator voltage, the SSR is mitigated or prevented with considering the maintenance of MPPT condition. So that, with direct control of the stator voltage, line current of the system is controlled indirectly and prevented from the induction generator effect. For this purpose, an additional controller called SSR damping controller is used. This controller is applied to GSC converter of the DFIG. Because the SSR depends on the speed and frequency of the generator rotor, the rotor speed is selected as the input signal of this controller. In order to simulate, the MATLAB/SIMULINK software has been used. To verify the proposed method, a DFIG based wind farm connected to an infinite bus by a series capacitor compensated transmission line, is considered.

**Keywords:** SSR, DFIG, SSR damping controller, induction generator effect, voltage control.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۷

نام نویسنده مسئول: علی اکبر مطیع بیرجندی.

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق.

## اختصارها

|        |  |
|--------|--|
| SSR:   | Sub Synchronous Resonance                        |
| IGE:   | Induction Generator Effect                       |
| TI:    | Torsional interaction                            |
| MPPT:  | Maximum Power Point Tracking                     |
| DFIG:  | Doubly-Fed Induction Generator                   |
| GSC:   | Grid Side Converter                              |
| RSC:   | Rotor Side Converter                             |
| SEIG:  | Self-Excited Induction Generator                 |
| FACTS: | Flexible Alternating Current Transmission System |
| SVC:   | Static VAR compensator                           |
| TCSC:  | Thyristor Controlled Series Capacitors           |
| GCSC:  | Gate Controlled Series Capacitor                 |
| SSSC:  | Static Synchronous Series Compensator            |
| PUCT:  | Public Utility Commission of Texas               |
| ERCOT: | Electric Reliability Council of Texas            |

## ۱ مقدمه

متصل شدن مزارع بادی دارای DFIG به خط انتقال با جبران ساز سری خازنی، احتمال رخداد پدیده تشدید زیر سنکرون (SSR) را در پی دارد. این پدیده ناشی از دو اثر مولد القایی و تداخلات پیچشی است که در مزارع بادی با DFIG به دلیل پایین بودن سختی شفت روتور (H)، احتمال رخداد تداخلات پیچشی (TI) بسیار ضعیف است. استفاده از خط با جبران ساز سری خازنی برای انتقال توان نیروگاه ها و مزارع بادی از سال ۲۰۰۵ آغاز شده است. در سال ۲۰۰۵، کمیسیون عام المنفعه تگزاس (PUCT) برای انتقال توان نیروگاه بادی در غرب تگزاس از جبران سازی ۵۰ درصد استفاده نمود. همچنین در جنوب ایالت مینه سوتا، شرکت اکسل از خطی با جبران سازی ۶۰ درصد برای انتقال توان الکتریکی استفاده نمود که یک نیروگاه بادی مجهز به DFIG با توان ۱۵۰ مگاوات به آن متصل است. اما در سال ۲۰۰۹، مزرعه بادی با DFIG انجمن قابلیت اطمینان الکتریکی تگزاس (ERCOT) با خط جبران شده خازن سری به صورت شعاعی قرار گرفت و اولین SSR در مزارع بادی رخ داد. در این اتفاق، یک خط دچار خطا شد و به دلیل تأخیر در خارج کردن خط، مزرعه بادی با شبکه جبران شده به صورت شعاعی قرار گرفت و در نتیجه نوسانات زیر سنکرونی ایجاد و خساراتی به خازن های سری و توربین بادی وارد شد [۱-۳]. از این سال به بعد راهکارهایی در زمینه تضعیف SSR در مزارع بادی با DFIG ارائه شدند. اما به طور کلی بررسی و تضعیف این پدیده در مزارع بادی با DFIG جبران شده با خازن سری، کمتر انجام شده و به دلیل خاصیت سلفی ژنراتور القایی و وجود خازن جبران ساز سری خازنی نیاز به مطالعات بیشتری وجود دارد.

برای نمونه در [۴]، به منظور تضعیف SSR در مزارع بادی مجهز به ژنراتورهای القایی خود تحریک (SEIG) پرداخته شده است. در این مرجع از UPFC برای تضعیف SSR استفاده شده است. به همین منظور یک کنترل کننده اضافی با نام میرا کننده زیر سنکرون به عنوان یک کنترل کننده تکمیلی در نظر گرفته شده است. در [۵-۸]، از SVC برای

تضعیف SSR مزرعه بادی مجهز به DFIG استفاده شده است. در [۵] سیگنال توان حقیقی خط به منظور میرا کردن SSR در نظر گرفته شده و کنترلر میرا کننده یک گین ساده است. روند تضعیف SSR این تجهیز نیز همانند دیگر ادوات FACTS تأثیر بر راکتانس است. بدین ترتیب تغییری در فرکانس تشدید ایجاد شده و لغزش تغییر می یابد. [۶، ۷] از جریان خط به عنوان سیگنال فیدبک برای SVC استفاده کرده اند تا SSR در مزارع بادی مجهز به DFIG متصل به خطی با جبران سازی سری خازنی را میرا کنند که راه حل مناسبی برای تغییر در امپدانس خط است. [۸] علاوه بر استفاده از SVC، تأثیر TCSC را نیز مورد بررسی قرار داده است. [۹، ۱۰] از GCSC به عنوان جدیدترین تجهیز از ادوات FACTS برای تضعیف SSR در مزارع بادی با DFIG استفاده کرده است. این مرجع به منظور کنترل GCSC از یک کنترل کننده با نام کنترل کننده میرایی SSR (SSRDC) بهره مند شده است. استفاده از STATCOM در تضعیف SSR مزارع بادی با ژنراتورهای خود تحریک نیز در [۹، ۱۵-۱۱] در نظر گرفته شده که کنترلرهای مختلف برای این تجهیز در این مراجع در نظر گرفته شده است. [۱۱] نیز تأثیر SSSC را در تضعیف SSR بررسی نموده است.

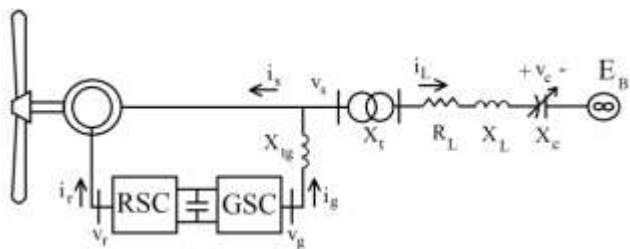
از آنجایی که مبدل های DFIG شباهتی به ادوات FACTS دارند، استفاده از ادوات FACTS می تواند از این دیدگاه مناسب نباشد. برای مثال می توان به مواردی همچون؛ هارمونیکی بودن، هزینه خرید و نگهداری بالای آن ها را از معایب ادوات FACTS برشمرد. از طرفی استفاده از ادوات FACTS و کنترلر آن ها امکان ایجاد تداخلات کنترلی زیر سنکرون را نیز در پی دارد. همچنین ادوات FACTS موازی مانند STATCOM، به طور غیرمستقیم در کنترل سرعت روتور و تضعیف SSR نقش دارند که در صورت تقاضای توان راکتیو اضافی از سوی شبکه، ممکن است کارایی این تجهیزات موازی در تضعیف SSR کم شود. به همین دلایل، استفاده از مبدل های DFIG در تضعیف SSR بهتر به نظر می رسد. در [۱۶، ۱۷] از مبدل GSC مزارع بادی با DFIG به منظور تضعیف SSR استفاده شده است. استفاده از GSC به دلیل شباهت آن به STATCOM در تضعیف SSR مناسب است. [۱۸] از مبدل سمت روتور (RSC) با هدف کنترل توان اکتیو به منظور تضعیف SSR در مزرعه بادی DFIG استفاده نموده است. مرجع [۱۹] نیز از هر دو مبدل GSC و RSC برای تضعیف SSR بهره گرفته است.

در برخی مقالات هم از روش های دیگر استفاده شده است. برای مثال در [۲۰] با خارج کردن خازن سری در زمان رخداد SSR از این پدیده جلوگیری نموده است. در [۲۱، ۲۲] از فیلتر BLOCKING که در فرکانس طبیعی شفت توربین-ژنراتور تنظیم می شود برای تضعیف SSR ناشی از تداخلات پیچشی استفاده شده است. ولی این فیلتر برای تضعیف SSR در مزارع بادی با DFIG مناسب نیست. زیرا SSR در مزارع بادی با DFIG به دلیل اثر مولد القایی روی می دهد و اثر تداخل پیچشی تأثیر خیلی ضعیفی در ایجاد پدیده SSR دارد. در [۲۳-۲۱] از فیلتر BYPASS استفاده شده است که به صورت موازی با خازن سری

سیمولینک، ناپایداری ناشی از SSR با سطح جبران‌سازی ۷۰٪ در یک مزرعه بادی با DFIG که به کمک یک خط انتقال جبران‌شده سری خازنی به شین بی‌نهایت متصل است اعمال شده است. سپس با کمک روش پیشنهادی از رخداد SSR و ناپایداری ناشی از آن جلوگیری به عمل آمده است. به‌طور کلی باید عنوان گردد که هدف مهم این تحقیق این بوده است که با کمک روش پیشنهادی، شرایطی فراهم شود که علاوه بر حفظ پایداری در زمان وقوع SSR، حالت دریافت نقطه حداکثر توان (MPPT) نیز حفظ شود. که این نتیجه بسیار مهم در مراجعی مانند [۱۶، ۱۷] دیده نمی‌شود.

## ۲- مدل‌سازی و روابط سیستم مورد تست

به‌منظور تحلیل پایداری دینامیکی و بررسی پدیده SSR، از نیروگاه بادی با DFIG استفاده می‌شود که با یک خط انتقال جبران‌شده سری خازنی به یک شین بی‌نهایت متصل است (شکل (۱)). طبق مراجع [۳۷-۳۴] یک مزرعه بادی می‌تواند به‌صورت یک نیروگاه بادی معادل مدل شود. زیرا که تمامی پارامترهای یک مزرعه بادی مشابه یک نیروگاه بادی معادل است. تنها توان مزرعه بادی برابر مجموع توان کل نیروگاه‌ها می‌شود. برای مثال یک مزرعه بادی با ۵۰ ژنراتور ۲ مگاواتی به‌صورت یک ژنراتور ۱۰۰ مگاواتی مدل می‌شود [۳۸].



شکل ۱: سیستم مورد تست IEEE، توربین بادی با DFIG متصل به شین بی‌نهایت با کمک خط جبران‌ساز سری خازنی

### ۲-۱- معادلات ژنراتور القایی در قاب dq0

ژنراتور القایی در قاب مرجع dq0 به‌صورت روابط (۱-۳) مدل‌سازی می‌شود [۳۸]:

$$\dot{X} = A.X + B.U \quad (1)$$

$$X = [i_{qs}, i_{ds}, i_{0s}, i_{qr}, i_{dr}, i_{0r}]^T \quad (2)$$

$$U = [V_{qs}, V_{ds}, V_{0s}, V_{qr}, V_{dr}, V_{0r}]^T \quad (3)$$

که:

خط قرار می‌گیرد و در فرکانس اصلی سیستم تنظیم می‌شود. بدین ترتیب مؤلفه‌های جریانی با فرکانس‌های کمتر از فرکانس اصلی از این فیلترها عبور خواهند کرد. بنابراین از وقوع SSR جلوگیری به عمل می‌آید. این فیلتر در تضعیف SSR ناشی از اثر مولد القایی مزارع بادی با DFIG مناسب است. زیرا اثر مولد القایی در نوسانات جریان خط دیده می‌شود و این تجهیز نیز به‌صورت سری در خط وارد می‌شود. در [۲۴] عنوان شده که در صورت استفاده از نیروگاه بادی با DFIG کارایی این فیلترها خوب است. ولی این فیلترها به‌تنهایی توانایی خوبی در تضعیف سریع و مناسب SSR ندارند و از لحاظ اقتصادی هم مناسب نیستند. همچنین در [۲۱، ۲۲، ۲۵، ۲۶]، از رله فرکانس زیر سنکرون و سیم‌پیچ میراگر در تضعیف SSR استفاده شده که از روش‌های پرهزینه است. در مرجع [۲۷] عنوان شده که با انتخاب سطوح جبران‌سازی مختلف می‌توان از SSR دوری کرد که به نظر روشی مناسب نیست. زیرا که انتخاب مناسب سطوح مختلف امکان‌پذیر نیست.

همچنین نوع جدیدی از SSR با عنوان تداخلات کنترلی وجود دارد که در [۲۸، ۲۹] به تضعیف آن پرداخته شده است. برای نمونه در [۲۹] با کمک روش مداری RLC به تضعیف SSR پرداخته شده است. نویسندگان [۳۰-۳۳] نیز به مطالعه و بررسی SSR پرداخته‌اند. برای نمونه در [۳۳] با کمک یک روش احتمالاتی به بررسی پایداری احتمالی ناشی از SSR پرداخته شده است.

اما موضوع مهمی که در زمینه مزارع بادی با DFIG وجود دارد این است که به‌منظور استفاده از ظرفیت‌های توان تولیدی آن و همچنین به دلایل اقتصادی، دریافت حداکثر توان (MPPT) بسیار مهم است. از طرفی در این مزارع و دیگر نیروگاه‌ها افزایش توان انتقالی با کمک جبران‌سازی سری خازنی مرسوم و اقتصادی است. ولی احتمال رخداد پدیده SSR را در پی دارد که باید از این پدیده جلوگیری شود. در مراجع پیشین به تضعیف SSR پرداخته شده است. اما در هیچ‌یک از این مراجع، تضعیف SSR به‌گونه‌ای انجام نشده است که حفظ MPPT به‌عنوان هدف مهم در نظر گرفته شود. در این تحقیق با حفظ شرایط MPPT، به تضعیف SSR در مزارع بادی با DFIG پرداخته شده است. به‌طوری‌که با توجه به اینکه SSR در مزارع بادی با DFIG ناشی از اثر مولد القایی است، این اثر تضعیف و جلوگیری شده است. برای این منظور با اعمال یک کنترلر اضافی به نام کنترلر میرا کننده SSR به قسمت کنترل ولتاژ استاتور مبدل GSC، از ناپایداری ناشی از SSR جلوگیری به عمل آمده است. کنترلر ولتاژ استاتور بر اساس دو هدف در نظر گرفته شده است. اولاً به‌عنوان عاملی که به‌طور غیرمستقیم می‌تواند از افزایشی شدن جریان خط (عامل اصلی ناپایداری ناشی از SSR که همان رخداد IGE است) جلوگیری نماید. ثانیاً عاملی است که تأثیری بر پارامترهای MPPT (از قبیل توان و گشتاور) ندارد. از طرفی به دلیل این‌که اثر مولد القایی به فرکانس و سرعت روتور وابسته است، از سرعت روتور ژنراتور نیز به‌عنوان سیگنال ورودی به کنترلر میرا کننده SSR استفاده شده است. به‌منظور تصدیق روش پیشنهادی، در نرم‌افزار

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_r \\ T_{ig} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-D_t - D_{ig})}{2H_t} & \frac{D_{ig}}{2H_t} & \frac{1}{2H_t} \\ \frac{D_{ig}}{2H_g} & \frac{(-D_g - D_{ig})}{2H_g} & \frac{1}{2H_g} \\ K_{ig} \cdot \omega_b & -K_{ig} \cdot \omega_b & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_r \\ T_{ig} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_{wind}}{2H_t} \\ \frac{T_e}{2H_g} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که  $\omega_t$  نمایانگر سرعت توربین بادی،  $\omega_r$  نمایانگر سرعت روتور ژنراتور و  $T_{ig}$  نمایانگر گشتاور پیچشی یا گشتاور داخلی بین دو جرم است.  $T_{wind}$  گشتاور ایجاد شده توسط باد و  $T_e$  گشتاور الکتریکی ژنراتور است. تمامی متغیرها در رابطه (۹) به صورت مقدار واحد (PerUnit) می‌باشند. گشتاور الکتریکی نیز از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. به منظور به دست آوردن نقطه حداکثر توان (MPPT)، گشتاور الکتریکی مرجع بر اساس یک جدول LOOKUP تعیین می‌شود (جدول (۱)). در این جدول، بر اساس هر سرعت باد مقدار مرجع گشتاور الکتریکی انتخاب شده و به کنترلرها اعمال می‌شود.

$$T_e = 0.5 X_M (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (10)$$

جدول ۱: جدول LOOKUP

|  | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|--|------|------|------|------|------|------|
|  | 0.75 | 0.85 | 0.95 | 1.05 | 1.15 | 1.25 |
|  | 0.32 | 0.49 | 0.69 | 0.95 | 1.25 | 1.6  |
|  | 0.43 | 0.58 | 0.73 | 0.90 | 1.09 | 1.28 |

### ۲-۳- مدل کنترلرهای مبدل‌های DFIG و خازن بین آن‌ها

مبدل‌های DFIG نیز نیاز به مدل‌سازی دینامیکی دارند. دینامیک مربوط به خازن حلقه DC بین مبدل‌های DFIG به صورت رابطه مرتبه اول مدل‌سازی می‌شود که روابط (۱۱-۱۳) این موضوع را نشان می‌دهند.

$$c.V_{DC} \cdot \frac{dV_{DC}}{dt} = -(P_r + P_g) \quad (11)$$

$$P_r = 0.5(v_{qr} i_{qr} + v_{dr} i_{dr}) \quad (12)$$

$$P_g = 0.5(v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds}) \quad (13)$$

که  $P_r$  توان حقیقی مربوط به مبدل RSC و  $P_g$  توان حقیقی مربوط به GSC می‌باشند.  $v_r$  و  $v_g$  به ترتیب ولتاژهای خروجی دو مبدل RSC و GSC می‌باشند. همچنین  $i_r$  و  $i_g$  به ترتیب جریان‌های خروجی دو مبدل RSC و GSC می‌باشند. شکل (۲) نحوه توزیع توان در حلقه DC بین مبدل‌های RSC و GSC را نمایش می‌دهد.

برای مدل‌سازی دینامیکی و مطالعه پدیده SSR از کنترلرهای نشان داده شده در شکل (۳) به منظور کنترل مبدل‌های RSC و GSC استفاده می‌شود. MPPT نیز با کمک جدول LOOKUP به کنترلر

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \\ v_{or} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A = -\omega_b \cdot G^{-1} \cdot F \quad (5)$$

$$B = \omega_b \cdot G^{-1} \quad (6)$$

$$G = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{lr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

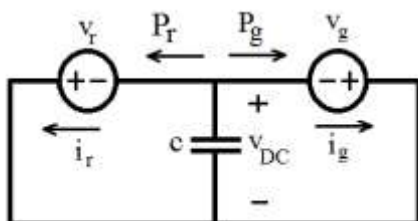
$$F = \begin{bmatrix} R_s & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & 0 & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & R_s & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X_M & 0 & R_r & \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X_{rr} & 0 \\ -\frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X_M & 0 & 0 & -\frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} X_{rr} & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

که  $\omega_b$  فرکانس زاویه‌ای مبنا یا همان فرکانس زاویه‌ای سنکرون می‌باشند و برابر ۳۱۴ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود.  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای قاب گردان dq0 است که در این تحقیق برابر با سرعت مبنا در نظر گرفته شده است.  $R_s$  مقاومت استاتور و  $R_r$  مقاومت روتور می‌باشند. همچنین  $X_M$  راکتانس مغناطیسی،  $X_{ls} = X_{ls} + X_M$  راکتانس نشی استاتور،  $X_{lr} = X_{lr} + X_M$  راکتانس نشی روتور،  $X_{rr} = X_{rr} + X_M$  و  $X_{lr}$  مقدار واحد (PerUnit) می‌باشند.

### ۲-۲- مدل شفت توربین بادی

مدل‌سازی شفت توربین بادی برای مطالعه SSR بر اساس دو جرم در نظر گرفته می‌شود که اولین جرم مربوط به توربین با سرعت پایین است و جرم دوم مربوط به ژنراتور با سرعت بالا است. مدل دینامیکی شفت به صورت رابطه (۹) نشان داده شده است [۳۸].

که  $I_{dL}$  و  $I_{qL}$  نیز جریان محورهای  $q$  و  $d$  عبوری خط انتقال بوده و  $v_{dc}$  و ولتاژهای محور  $q$  و  $d$  دو سر خازن جبران ساز سری خط می باشند.  $v_{dc}$  و ولتاژهای  $q$  و  $d$  ولتاژ استاتور ژنراتور،  $E_{dB}$  و  $E_{qB}$  ولتاژهای  $q$  و  $d$  شین بی نهایت می باشند. همچنین  $R_L$ ،  $X_L$ ،  $X_c$  به ترتیب مقاومت خط، راکتانس خط و راکتانس خازن جبران ساز سری خط می باشند. همه ولتاژها، جریان ها، مقاومت ها و راکتانس ها به صورت مقدار واحد (PerUnit) در نظر گرفته می شوند.



شکل ۲: مدل سازی خازن حلقه DC بین مبدل های RSC و GSC

### ۲-۵- روابط جبری مبدل GSC

روابط جبری ولتاژ و جریان خروجی مبدل GSC از روابط (۱۵-۱۸) به دست می آیند.

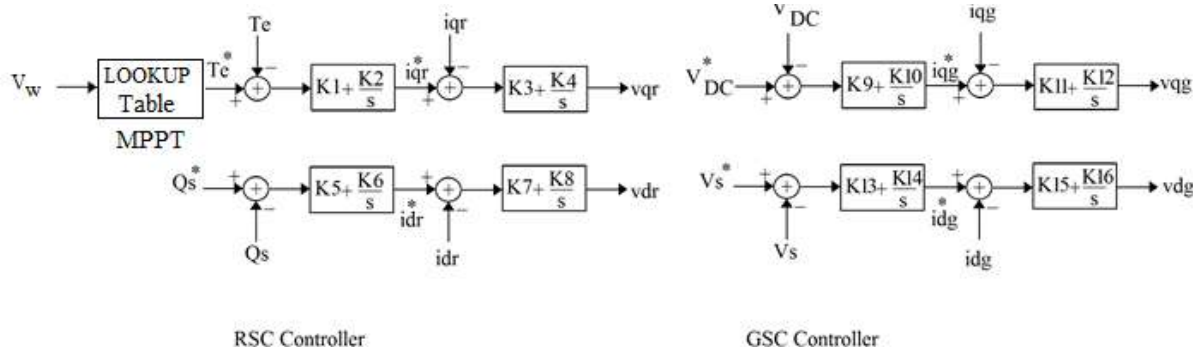
$$v_{qs} = v_{qs} + X_{Lg} \cdot i_{dg} \quad (15)$$

$$v_{ds} = v_{ds} - X_{Lg} \cdot i_{qg} \quad (16)$$

$$i_{qg} = i_{qs} + i_{qL} \quad (17)$$

$$i_{dg} = i_{ds} + i_{dL} \quad (18)$$

که  $X_{Lg}$  راکتانس ترانسفورماتور بین مبدل GSC و ترمینال ژنراتور است.



شکل ۳: کنترلرهای دو مبدل RSC و GSC و نحوه تأثیر MPPT در مدل سیستم.

$f_s$  فرکانس سنکرون و  $X_L$  راکتانس کل سلف خط، ترانسفورماتورها و سلف ژنراتور می باشند.  $X_c$  راکتانس خازن سری بوده که درصدی از راکتانس  $X_L$  است که به آن درصد جبران سازی (K%) گفته می شود. به واسطه فرکانس  $f_n$ ، لغزش  $s_n$  طبق رابطه (۱۹) معرفی می شود [۳۸، ۴۱].

$$s_n = \frac{f_n - f_r}{f_n} \quad (19)$$

که  $f_r$  فرکانس الکتریکی سرعت دوران روتور است. از آنجایی که معمولاً از  $f_r$  کمتر است،  $s_n$  منفی است. بنابراین مقاومت معادل روتور

RSC اعمال و همچنین در مدل شفت توربین برای گشتاور باد ( $T_{wind}$ ) در نظر گرفته می شود.

انتخاب کنترل کننده PI به عنوان کنترل کننده های دو مبدل RSC و GSC بر این اساس است که مرسوم ترین کنترل کننده برای DFIG ها، PI است. البته امکان استفاده از کنترل کننده های دیگر نیز وجود دارد. در [۳۹] که به طراحی کنترل کننده توان و همچنین بهبود میرایی نوسانات پیچشی دیده شده در توربین ژنراتور DFIG نصب شده در سایت بینالود پرداخته شده، از کنترل کننده PI استفاده شده است. همچنین مرجع [۴۰] موضوع کنترل توان های DFIG را با کمک کنترل مد لغزشی مقاوم مورد مطالعه قرار داده است.

### ۲-۴- مدل خط انتقال

مدل دینامیکی خط انتقال و خازن سری آن در رابطه (۱۴) نشان داده شده است [۳۸].

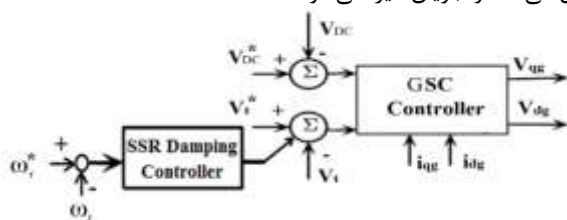
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{qL} \\ \dot{I}_{dL} \\ \dot{v}_{qc} \\ \dot{v}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{X_L} \omega_b & -\omega & -\frac{1}{X_L} \omega_b & 0 \\ \omega & -\frac{R_L}{X_L} \omega_b & 0 & -\frac{1}{X_L} \omega_b \\ \omega_b X_c & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega_b X_c & \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qL} \\ I_{dL} \\ v_{qc} \\ v_{dc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{X_L} \omega_b & 0 \\ 0 & \frac{1}{X_L} \omega_b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} - E_{qB} \\ v_{ds} - E_{dB} \end{bmatrix}$$

### ۳- تحلیل SSR

پدیده SSR حالتی است که نیروگاه بادی در یک یا چند فرکانس زیر سنکرون با شبکه الکتریکی انرژی مبادله می کند. در صورت عدم پیش گیری، این پدیده خساراتی را در پی دارد. پدیده ناشی از دو اثر مولد القایی و اثر تداخل پیچشی است. در یک شبکه با جبران سازی سری خازنی، شبکه دارای یک فرکانس طبیعی است که به وسیله رابطه  $f_n = f_s \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$  محاسبه می شود. در این رابطه  $f_n$  فرکانس تشدید زیر سنکرون نامیده می شود و واحد آن نیز هرتز است.

می‌شود. بنابراین مجموع مقاومت‌های سیستم به سمت مثبت شدن میل می‌کند و جریان میرا می‌شود.



شکل ۴: نحوه اعمال کنترلر میرا کننده SSR به کنترلر GSC.  $V_i$  همان ولتاژ ترمینال یا ولتاژ استاتور ژنراتور است

## ۵- نتایج

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار سیمولینک MATLAB استفاده شده است. سیستم مورد تست در شکل (۱) نشان داده شده که سیستم معروف IEEE است [۳۸]. این سیستم دارای یک مزرعه بادی معادل با توان ۱۰۰ مگاوات است که با کمک یک خط انتقال جبران‌شده سری خازنی به یک شین بی‌نهایت متصل است و پارامترهای آن در [۳۸، ۱۰] ارائه شده‌اند.

ابتدا لازم است مد مربوط به فرکانس زیر سنکرون تحلیل شود. به دلیل این‌که روابط دیفرانسیلی و جبری سیستم غیرخطی می‌باشند، نیاز است روابط کل سیستم حول نقطه کار خطی سازی شده و مد مربوط به فرکانس زیر سنکرون که همان مد SSR است به دست آید. همچنین لازم است در سطوح جبران‌سازی مختلف، پایداری مد فرکانس زیر سنکرون بررسی شود. جدول (۲) تأثیر سطح جبران‌سازی را بر روی مد SSR نمایش می‌دهد. با توجه به این‌که تمامی روابط به قاب مرجع dq0 که با سرعت سنکرون در حال چرخش است انتقال داده شده‌اند، فرکانس مد SSR برابر با  $f_s - f_n$  است. بنابراین فرکانس تشدید زیر سنکرون از تفریق فرکانس سنکرون و فرکانس مد SSR حاصل می‌شود. این موضوع در جدول (۲) نشان داده شده است. طبق رابطه مربوط به لغزش  $s_n$ ، با افزایش فرکانس تشدید اندازه  $s_n$  کوچک‌تر شده و به دلیل منفی بودن این لغزش و مقاومت روتور، سیستم به سمت ناپایداری می‌رود. از طرفی افزایش فرکانس تشدید هم به افزایش سطح جبران‌سازی وابسته است (رابطه ۱۹). بنابراین با افزایش سطح جبران‌سازی، سیستم به سمت ناپایداری می‌رود. شکل (۵) این موضوع را نشان می‌دهد. طبق این شکل، در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه سطح جبران‌سازی ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد برای این سیستم باعث ناپایداری مد SSR شده است. همچنین شکل (۶) اثر سرعت باد را بر روی مد SSR نشان می‌دهد. کاهش سرعت باد، باعث کاهش سرعت و فرکانس روتور شده و طبق رابطه لغزش  $s_n$ ، لغزش از لحاظ اندازه کوچک‌تر شده و اندازه مقاومت معادل روتور بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین مقاومت معادل سیستم به سمت منفی شدن پیش رفته و سیستم ناپایدار می‌شود. در مناطقی که از مزارع بادی استفاده می‌شود، معمولاً سرعت باد در حدود ۶ تا ۸ متر بر ثانیه بوده و امکان جبران‌سازی بالا میسر نیست. لازم به ذکر است به دلیل این‌که در مزارع بادی با DFIG، SSR ناشی از اثر

در فرکانس زیر سنکرون منفی است. به عبارت دیگر  $R_{r,eq} = R_r / s_n$  منفی است. اگر دامنه این مقاومت از مجموع مقاومت‌های شبکه و آرمیچر بیشتر شود، آنگاه سیستم دارای یک مقاومت منفی در فرکانس زیر سنکرون خواهد شد (مقاومت کل سیستم  $R_{sys}$  منفی می‌شود). در این صورت طبق رابطه (۲۰) قسمت دوم جریان کل سیستم دارای تابع‌نمایی با توان مثبت خواهد شد. بنابراین جریان خط به صورت تقویت‌شونده افزایش می‌یابد که به این پدیده اثر مولد القایی (IGE) گفته می‌شود. با توجه به آنکه، به دلیل وجود جبران‌ساز سری خازنی، مؤلفه زیر سنکرون با فرکانس  $f_n$  در جریان‌ها و ولتاژهای مدار استاتور و شبکه ظاهر می‌شود، فرکانس مکمل این مؤلفه به صورت  $(f_s - f_n)$  در جریان روتور پدیدار می‌شود. در صورتی که فرکانس مد پیچشی بین دو جرم شفت روتور با فرکانس مکمل شبکه  $(f_s - f_n)$  برابر و یا نزدیک آن شود، اثر تداخل پیچشی (TI) ایجاد می‌شود. به دلیل پایین بودن سختی شفت روتور نیروگاه‌های بادی، فرکانس مدهای پیچشی روتورهای آن‌ها پایین است. به همین دلیل SSR ناشی از اثر تداخل پیچشی (TI) در نیروگاه‌های بادی به ندرت اتفاق می‌افتد. زیرا که فرکانس مدهای پیچشی در نیروگاه‌های بادی حدود ۱ تا ۳ هرتز است و برای بروز اثر تداخل پیچشی در این شرایط لازم است فرکانس تشدید در حدود ۵۷ تا ۵۹ هرتز به وجود آید که به سطح جبران‌سازی خیلی بالایی نیاز دارد لذا احتمال وقوع آن بسیار کم است [۳۸].

$$i = A \cdot \sin(2\pi f_s t) + e^{-\left(\frac{R_{ss}}{L}\right)t} \cdot B \cdot \sin(2\pi f_n t + \theta) \quad (20)$$

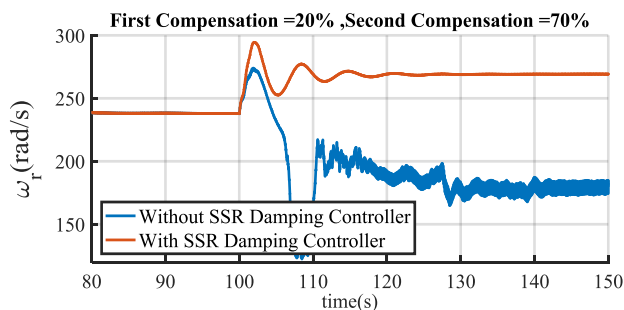
## ۴- کنترلر میرا کننده SSR

در این تحقیق به منظور تضعیف نوسانات ناشی از SSR از یک کنترلر به نام کنترلر میرا کننده SSR استفاده شده است. این کنترلر به قسمت کنترل ولتاژ خروجی استاتور ژنراتور (ولتاژ ترمینال) کنترلر میدل GSC اعمال شده است. از آنجایی که کنترلر GSC شباهتی به STATCOM دارد و همچنین SSR نیز در مزارع بادی با DFIG ناشی از مولد القایی است، بنابراین به نظر می‌رسد این کنترلر بتواند از اثر مولد القایی که در جریان خط پدیدار می‌شود، با کمک کنترل ولتاژ یک سمت خط انتقال (همان ولتاژ خروجی استاتور) جلوگیری کند. در حقیقت ایده این روش در محدود نمودن جریان سیستم است. زیرا که اثر مولد القایی باعث افزایشی شدن جریان سیستم می‌شود. بنابراین اگر جریان سیستم به یک مقدار معین میرا شود، از ناپایداری ناشی از SSR جلوگیری به عمل می‌آید. نحوه استفاده از کنترلر میرا کننده SSR در شکل (۴) نشان داده شده که به کنترلر GSC اعمال می‌شود. این کنترلر شامل یک کنترلر PI و یک فیلتر است. سیگنال ورودی به این کنترلر سرعت انتخاب شده است. زیرا لغزش  $s_n$  به سرعت و فرکانس روتور ژنراتور وابسته است. اگر فرکانس روتور افزایش یابد، طبق رابطه (۱۹) لغزش منفی از لحاظ اندازه بزرگ‌شده و مقاومت معادل روتور  $(R_{r,eq} = R_r / s_n)$  که دارای مقدار منفی است، از لحاظ اندازه کوچک

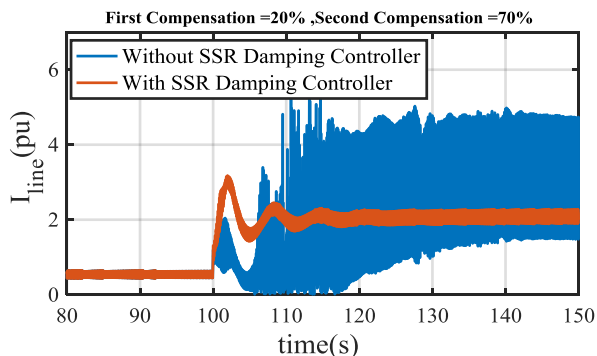
سمت ناپایداری ناشی از SSR می‌رود. درحالی‌که با اعمال کنترلر میرا کننده SSR، سرعت روتور و یا فرکانس روتور افزایش یافته که بدین‌صورت از ناپایداری ناشی از SSR جلوگیری به عمل می‌آید. این موضوع بدین علت است که از سرعت روتور به‌عنوان سیگنال انتخابی برای کنترلر پیشنهادی استفاده شده است. این افزایش سرعت بسیار دقیق و صحیح است. چراکه طبق رابطه (۱۹) درصورتی‌که اندازه  $s_n$  بزرگ‌تر شود، مقاومت معادل نیز از لحاظ اندازه کوچک می‌شود و سیستم به سمت پایداری می‌رود. بنابراین افزایش فرکانس و یا سرعت روتور در افزایش اندازه  $s_n$  و بهبود پایداری مؤثر است. این موضوع در رابطه (۲۱) توصیف شده است.

$$f_r \downarrow \Rightarrow |s_n| \uparrow \Rightarrow |R_{r,eq}| \downarrow \Rightarrow R_{sys} \geq 0 \quad (21)$$

همان‌طور که گفته شد، در مزارع بادی با DFIG ناشی از اثر مولد القایی است. اثر مولد القایی در جریان خط دیده می‌شود. بنابراین طبق شکل (۸) دیده می‌شود با اعمال کنترلر میرا کننده SSR، جریان خط میرا شده و افزایشی نیست. زیرا که این کنترلر توانسته لغزش  $s_n$  را از لحاظ اندازه افزایش داده و به طبع آن مقاومت معادل کل سیستم مثبت بماند. طبق این شکل، جریان خط در حالت پایدار افزایش داشته است. دلیل آن نیز این‌طور قابل توجیه است که ولتاژ مزرعه بادی افزایش یافته و همچنین لغزش منفی ناشی از فرکانس تشدید موجود در روتور باعث کاهش مقاومت کل سیستم از لحاظ اندازه شده و در نتیجه جریان خط افزایش یافته است.

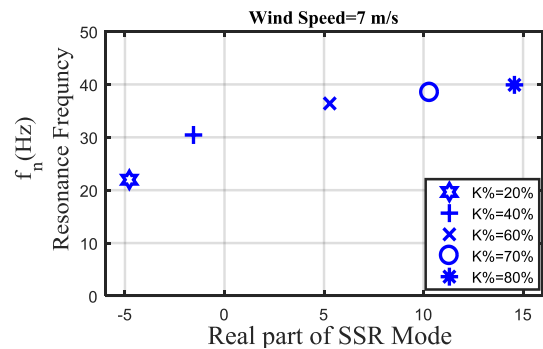


شکل ۷: نوسانات سرعت روتور در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه و با افزایش سطح جبران‌سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰

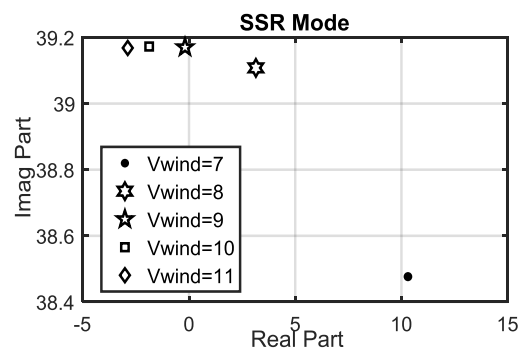


شکل ۸: نوسانات جریان خط در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه و با افزایش سطح جبران‌سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰

مولد القایی است، برای به‌دست‌آوردن مد SSR می‌توان دینامیک شفت و کنترلرهای RSC و GSC را در نظر نگرفت.



شکل ۵: ناپایداری مد SSR بر اساس افزایش سطح جبران‌سازی در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه



شکل ۶: مد SSR در سطح جبران‌سازی ۷۰٪

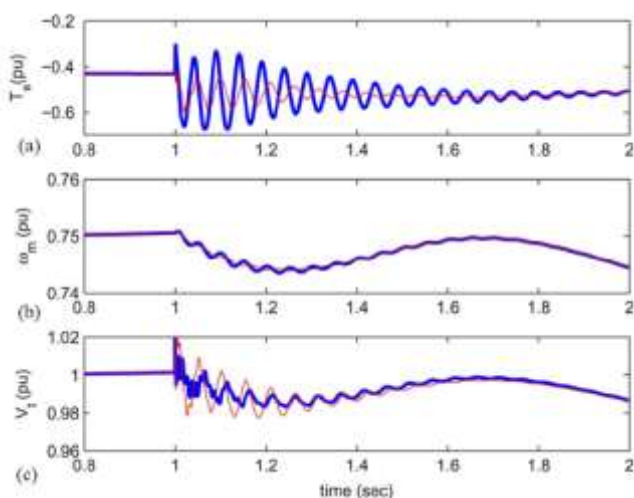
جدول ۲: بررسی مد SSR و فرکانس تشدید بر اساس سطح جبران‌سازی

| فرکانس تشدید (هرتز) | فرکانس مد SSR (هرتز) | مد SSR        | سطح جبران‌سازی (K%) |
|---------------------|----------------------|---------------|---------------------|
| ۲۱/۹۷               | ۳۸/۰۳                | -4.78+j238.93 | ۲۰٪                 |
| ۳۰/۴۴               | ۲۹/۵۶                | -1.56+j185.71 | ۴۰٪                 |
| ۳۶/۴۰               | ۲۳/۶۰                | 5.29+j148.27  | ۶۰٪                 |
| ۳۸/۴۸               | ۲۱/۵۲                | 10.31+j135.24 | ۷۰٪                 |
| ۳۹/۹۲               | ۲۰/۰۸                | 14.57+j126.17 | ۸۰٪                 |

برای تأیید روش پیشنهادی این تحقیق که همان اعمال کنترلر میرا کننده SSR به GSC است، ابتدا فرض شده است سیستم دارای سطح جبران‌سازی ۲۰٪ بوده و در حال عملکرد عادی خود است. سپس در ثانیه ۱۰۰، سطح جبران‌سازی به ۷۰٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم دارای نوسانات شده و به سمت ناپایداری می‌رود. اما با اعمال کنترلر میرا کننده SSR به‌خوبی این نوسانات را تضعیف نموده و سیستم را در حالت پایدار نگه می‌دارد. این موضوع در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

طبق جدول LOOKUP، در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه سرعت روتور ۰/۷۵ پر یونیت است. بنابراین با در نظر گرفتن سرعت مبنای برابر با ۳۱۴ رادیان بر ثانیه، سرعت روتور حدود ۲۳۵ رادیان بر ثانیه خواهد بود. این موضوع در شکل (۷) قبل از تغییرات در ثانیه ۱۰۰ قابل مشاهده است. طبق این شکل، سیستم بدون کنترلر میرا کننده SSR و با افزایش درصد جبران‌سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰ به

شکل ۱۲: ولتاژ خازن بین دو مبدل RSC و GSC در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه و با افزایش سطح جبران سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰

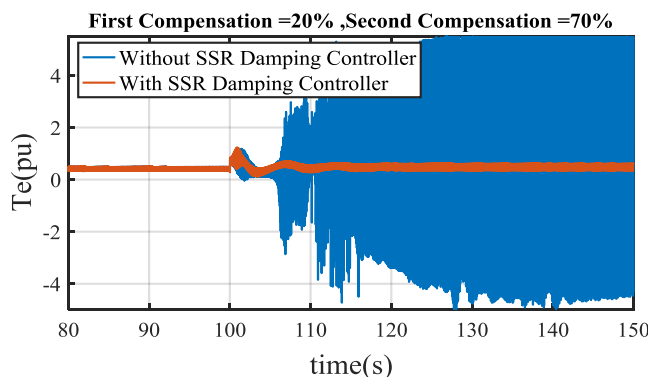


شکل ۱۳: نتایج مرجع [۱۶]

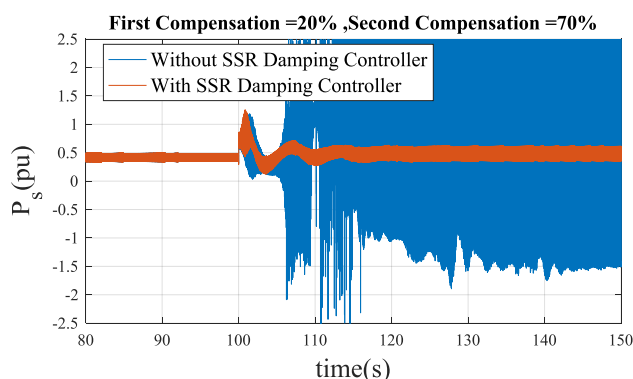
شکل (۹) نوسانات گشتاور الکتریکی را نشان می‌دهد. نتیجه خیلی خوبی که از این شکل حاصل می‌شود این است که علاوه بر میرا شدن نوسانات، بازگشت گشتاور الکتریکی به مقدار قبل از تغییر سطح جبران سازی است. این بدان معنی است که شرایط دریافت نقطه حداکثر توان (MPPT) در همان سرعت ۷ متر بر ثانیه تغییری نکرده است. این نتیجه بسیار مهم و قابل توجه است. دلیل این نتیجه نیز در این است که کنترلر پیشنهادی بر روی ولتاژ ترمینال اثر گذاشته و با کمک تغییر ولتاژ توانسته عامل ناپایداری ناشی از SSR یعنی افزایشی بودن جریان کل سیستم را محدود نماید. درحالی که در همان سرعت باد و با این که سیستم دچار ناپایداری ناشی از SSR شده بود، گشتاور را در مقدار مرجع حفظ نموده است. شکل (۱۰) نیز که مربوط به توان الکتریکی است به خوبی حفظ MPPT را تأیید می‌کند.

همچنین در شکل (۱۱) نوسانات ولتاژ استاتور نشان داده شده است. طبق این شکل، به منظور جلوگیری از ناپایداری ناشی از SSR لازم است ولتاژ استاتور افزایش یافته که ناشی از کنترلر میرا کننده SSR است. شکل (۱۲) نیز نوسانات ولتاژ خازن بین مبدل های RSC و GSC را نشان می‌دهد. استفاده از کنترلر میرا کننده SSR باعث شده

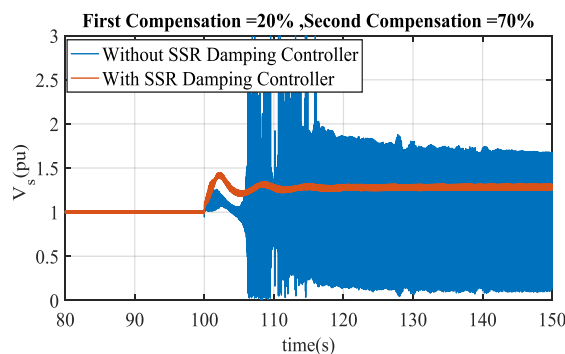
این ولتاژ نیز پایدار بماند و همچنین نوسانات ناچیزی داشته باشد. به منظور نشان دادن مزیت های کنترلر پیشنهادی، سیگنال انتخابی برای این کنترلر و شبیه سازی های این تحقیق، نتایج مرجع [۱۶] مورد تحلیل قرار گرفته است. با بررسی این مرجع، چندین ابهام در نتایج آن وجود دارد. برای مثال شکل (۱۳) یکی از نتایج این مرجع را نشان می‌دهد. اولین موضوعی که در نتایج این مرجع به چشم می‌خورد این است که میرایی برای سرعت و ولتاژ حاصل نشده است. موضوع دوم نیز این است که گشتاور از شرایط MPPT دورتر شده است. طبق این شکل گشتاور از حدود ۰/۴۳- به حدود ۰/۵- رسیده است. گفتنی است



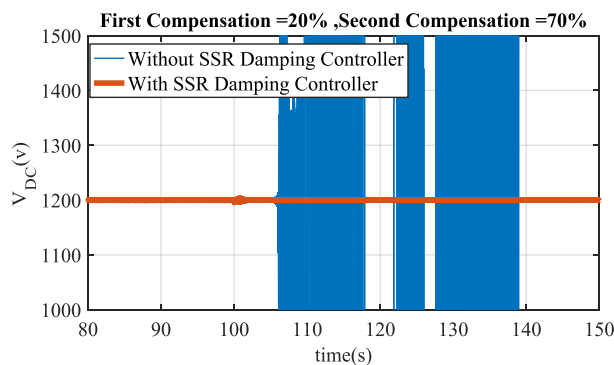
شکل ۹: گشتاور الکتریکی در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه و با افزایش سطح جبران سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰



شکل ۱۰: توان الکتریکی استاتور در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه و با افزایش سطح جبران سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰



شکل ۱۱: ولتاژ خروجی استاتور ژنراتور در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه و با افزایش سطح جبران سازی از ۲۰٪ به ۷۰٪ در ثانیه ۱۰۰





- [8] R.K. Varma, et al., "Mitigation of Subsynchronous Resonance in a Series-Compensated Wind Farm Using FACTS Controllers", IEEE Transactions on Power Delivery, 23(3): p. 1645-1654, 2008.
- [9] H.A. Mohammadpour, and E. Santi, "Modeling and Control of Gate-Controlled Series Capacitor Interfaced With a DFIG-Based Wind Farm", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(2): p. 1022-1033, 2015.
- [10] H.A. Mohammadpour, Y.J. Shin, E. Santi. "SSR analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a gate-controlled series capacitor", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE. 2014.
- [11] M.S.E. Moursi, V. Khadkikar. "Novel control strategies for SSR mitigation and damping power system oscillations in a series compensated wind park", IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. 2012.
- [12] S. Golshannavaz, M. Mokhtari, and D. Nazarpour. "SSR suppression via STATCOM in series compensated wind farm integrations", 2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering. 2011.
- [13] A.F. Abdou, et al. "Damping of subsynchronous oscillations and improve transient stability for wind farms", Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT), 2011 IEEE PES. 2011.
- [14] A. Moharana, et al. "SSR mitigation in wind farm connected to series compensated transmission line using STATCOM", 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. 2012.
- [15] A. Moharana, R.K. Varma, and R. Seethapathy, "SSR Alleviation by STATCOM in Induction-Generator-Based Wind Farm Connected to Series Compensated Line", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(3): p. 947-957, 2014.
- [16] L. Fan, Z. Miao, "Mitigating SSR Using DFIG-Based Wind Generation", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 3(3): p. 349-358, 2012.
- [17] H.A. Mohammadpour, et al., "SSR damping in wind farms using observed-state feedback control of DFIG converters", Electric Power Systems Research, 123: p. 57-66, 2015.
- [18] Z. Bin, et al., "An active power control strategy for a DFIG-based wind farm to depress the subsynchronous resonance of a power system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 69: p. 327-334, 2015.
- [19] H.A. Mohammadpour, E. Santi, "SSR Damping Controller Design and Optimal Placement in Rotor-Side and Grid-Side Converters of Series-Compensated DFIG-Based Wind Farm", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6(2): p. 388-399, 2015.
- [20] H. Xie, et al., "Subsynchronous resonance characteristics in presence of doubly-fed induction generator and series compensation and mitigation of subsynchronous resonance by proper control of series capacitor", IET Renewable Power Generation, 8(4): p. 411-421, 2014.
- [21] K.R. Padiyar, "Power System Dynamics Stability and Control", Hyderabad, India: BS Publications, 2011.
- [22] K.R. Padiyar, *Analysis of Subsynchronous Resonance in Power System*, 1999, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [23] G.D. Irwin, A.K. Jindal, and A.L. Isaacs. "Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems", 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011.
- [24] J. D. S. Han C, et al, ERCOT CREZ Reactive Power Compensation Study. 2010.
- [25] K. Narendra, et al. "New microprocessor based relay to monitor and protect power systems against sub-harmonics", Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE. 2011.
- [26] Reader's guide to subsynchronous resonance. IEEE Transactions on Power Systems, 1992. 7(1): p. 150-157.
- [27] M. Bongiorno, Petersson A, The Impact of Wind Farms on Subsynchronous Resonance in Power Systems-Elforsk Rapport 11:29. 2011.
- [28] H. Liu, et al., "Mitigation of SSR by embedding subsynchronous notch filters into DFIG converter controllers", IET Generation, Transmission & Distribution, 11(11): p. 2888-2896, 2017.
- [29] H. Liu, et al., "Quantitative SSR Analysis of Series-Compensated DFIG-Based Wind Farms Using Aggregated RLC

این مرجع از ولتاژ خازن به‌عنوان سیگنال ورودی به کنترلر پیشنهادی خود با نام کنترلر تکمیلی بهره گرفته است.

بنابراین با نتایج حاصله این تحقیق و بررسی نتایج مرجع مهم [۱۶]، به نظر می‌رسد استفاده از کنترلر پیشنهادی و سیگنال سرعت به‌عنوان ورودی به این کنترلر هم به لحاظ پایداری و به لحاظ حفظ شرایط MPPT مناسب است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف تضعیف SSR، کنترلری میرا کننده پیشنهاد شد. این کنترلر به‌منظور جلوگیری از اثر مولد القایی به مرجع ولتاژ مبدل GSC اعمال می‌شود. بدین‌صورت با کنترل مستقیم ولتاژ و کنترل غیرمستقیم جریان کل سیستم، از SSR ناشی از اثر مولد القایی جلوگیری به عمل می‌آید. نتایج حاکی از آن است که این کنترلر توانسته از افزایشی شدن جریان کل سیستم و ناپایداری ناشی از اثر مولد القایی جلوگیری نماید. سرعت روتور ژنراتور نیز به‌عنوان سیگنال ورودی به کنترلر میرا کننده SSR انتخاب‌شده که به‌منظور افزایش اندازه لغزش ناشی از فرکانس تشدید در نظر گرفته‌شده است. همچنین از نتیجه‌های بسیار مهمی که در این تحقیق به‌دست آمده، این است که توان و گشتاور الکتریکی مزرعه بادی در شرایط وقوع SSR و با اعمال کنترلر پیشنهادی از مقدار نقطه بیشینه توان (MPPT) دور نشده است. این موضوع بسیار حائز اهمیت است. چراکه این کنترلر توانسته در یک شرایط ناپایدار ناشی از SSR، سیستم را به حالت پایدار و همچنین تولید توان الکتریکی را به حالت مقدار قبل از ناپایداری برساند. دلیل موفقیت این کنترلر در حفظ شرایط MPPT این است که فقط بر عامل ناپایداری ناشی از SSR که همان افزایشی بودن جریان کل سیستم است اثر گذاشته است.

## مراجع

- [1] L. Wang, et al., "Mitigation of Multimodal Subsynchronous Resonance Via Controlled Injection of Supersynchronous and Subsynchronous Currents", IEEE Transactions on Power Systems, 29(3): p. 1335-1344, 2014.
- [2] M. Sahni, et al. "Advanced screening techniques for Sub-Synchronous Interaction in wind farms", Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES. 2012.
- [3] M. Sahni, et al. "Sub-synchronous interaction in Wind Power Plants- part II: An ercot case study", Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. 2012.
- [4] S. Golshannavaz, et al., "Application of UPFC to Enhancing Oscillatory Response of Series-Compensated Wind Farm Integrations", IEEE Transactions on Smart Grid, 5(4): p. 1961-1968, 2014.
- [5] H. Xie and M.M.d. Oliveira. "Mitigation of SSR in presence of wind power and series compensation by SVC", Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on. 2014.
- [6] D.H.R. Suriyaarachchi, et al. "Application of an SVC to damp sub-synchronous interaction between wind farms and series compensated transmission lines", 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012.
- [7] V.P. Boopathi, et al. "Analysis and mitigation of subsynchronous oscillations in a radially-connected wind farm", Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014. 2014.

- Circuit Model", IEEE Transactions on Power Systems, 32(1): p. 474-483, 2017.
- [30] X. Xie, et al., "Characteristic Analysis of Subsynchronous Resonance in Practical Wind Farms Connected to Series-Compensated Transmissions", IEEE Transactions on Energy Conversion, 32(3): p. 1117-1126, 2017.
- [31] Y. Song, F. Blaabjerg, "Overview of DFIG-Based Wind Power System Resonances Under Weak Networks", IEEE Transactions on Power Electronics, 32(6): p. 4370-4394, 2017.
- [32] Y. Song, X. Wang, and F. Blaabjerg, "Impedance-Based High-Frequency Resonance Analysis of DFIG System in Weak Grids", IEEE Transactions on Power Electronics, 32(5): p. 3536-3548, 2017.
- [33] W. Chen, et al., "Probabilistic Stability Analysis of Subsynchronous Resonance for Series-Compensated DFIG-Based Wind Farms", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9(1): p. 400-409, 2018.
- [34] R. Pivko, et al. "Integrating Large Wind Farms into Weak Power Grids with Long Transmission Lines", in 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. 2005.
- [35] N.W. Miller, et al. "Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine-generators for stability simulations", in Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE. 2003.
- [36] J.T. Bialasiewicz, E. Muljadi. "The Wind Farm Aggregation Impact on Power Quality", in IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. 2006.
- [37] L.M. Fernández, et al. "Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines", Renewable Energy, 33(1): p. 129-140, 2008.
- [38] L. Fan, et al., "Modeling of DFIG-Based Wind Farms for SSR Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, 25(4): p. 2073-2082, 2010.
- [۳۹] محسن رحیمی، محمدرضا اسماعیلی، "طراحی کنترل کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی DFIG-710kw نصب شده در سایت بینالود"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحات ۱۲۳-۱۳۴، ۱۳۹۵.
- [۴۰] احسان رنجبر، محمد کریم الدینی، مهدی اسدی، "کنترل مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو در نیروگاه‌های بادی مجهز به DFIG با استفاده از کنترل مد لغزشی مقاوم"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، انتشار آنلاین آذر ۱۳۹۶.
- [41] L. Fan, et al., "Modal Analysis of a DFIG-Based Wind Farm Interfaced With a Series Compensated Network", IEEE Transactions on Energy Conversion, 26(4): p. 1010-1020, 2011.