



## بررسی اثر SSSC بر پایداری سیستم قدرت متصل به توربین‌های بادی مبتنی بر SCIG و DFIG

احمدرضا عبداللهی چیرانی<sup>1\*</sup>، علی کرمی<sup>2</sup>

1- دانشجوی مقطع دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[bahaminabdollahi@gmail.com](mailto:bahaminabdollahi@gmail.com)

2- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[karami\\_s@guilan.ac.ir](mailto:karami_s@guilan.ac.ir)

### چکیده

ظرفیت سرمایه‌گذاری در زمینه تولید برق بادی به طور قابل توجهی در حال رشد است. اما نفوذ روز افزون انرژی بادی در شبکه می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شود و این امر تأثیر منفی بر کیفیت توان خواهد داشت. در سال‌های اخیر اثرات توربین‌های بادی بر پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در گذشته معمولاً از توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی قفس سنجایی (SCIG) به دلیل هزینه پایین و سادگی استفاده می‌شد. اما در سال‌های اخیر بیشتر از توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) به دلیل پایداری بهتر استفاده می‌شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که عملکرد توربین‌های بادی متصل به شبکه را می‌توان با نصب عناصر سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)، بهبود بخشید. در این مقاله عملکرد یک توربین بادی 9 مگاواتی مبتنی بر SCIG و DFIG در حضور و عدم حضور جبران‌کننده سری سنکرون استاتیکی (SSSC) در نقطه اتصال مشترک (PCC)، با در نظر گرفتن اتصال کوتاه‌های تک‌فاز و دوفاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم مورد مطالعه، از یک شاخص پایداری ولتاژ (VSI) استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در مواجهه با خطای دوفاز که متغیرهای سیستم نوساناتی را تجربه می‌نمایند، SSSC به سرعت تر میرا شدن نوسانات ایجاد شده و بهبود پایداری سیستم کمک می‌نماید. به طور خاص، نوسانات مربوط به ولتاژ، توان راکتیو و توان اکتیو توربین بادی در حضور SSSC، به ترتیب در حدود 0.3 ثانیه، 0.5 ثانیه و 0.6 ثانیه سریع‌تر میرا می‌شوند. تمام شبیه‌سازی‌ها در MATLAB/Simulink انجام شده است.

کلیدواژه‌گان: توربین بادی، ژنراتور القایی قفس سنجایی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، پایداری سیستم‌های قدرت، FACTS، SSSC

## Investigation of the impact of SSSC on the stability of the power system connected to wind turbines based on SCIG and DFIG

Ahmadreza Abdollahi Chirani<sup>1\*</sup>, A. Karami<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

[bahaminabdollahi@gmail.com](mailto:bahaminabdollahi@gmail.com)

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

[karami\\_s@guilan.ac.ir](mailto:karami_s@guilan.ac.ir)

Received: 16 June 2023 Accepted: 20 April 2024

### Abstract

The investment capacity in wind power generation is growing significantly. However, the increasing penetration levels of wind energy in the network may lead to the system instability and this may have negative impacts on the power quality in the system. In recent years, the effects of wind turbines on the voltage stability of power systems have received much attention. In the past, wind turbines based on squirrel cage induction generator (SCIG) were usually used due to their low cost and simplicity. But in recent years, wind turbines based on doubly-fed induction generator (DFIG) are mostly employed because they are more stable. Recent studies have shown that the performance of the grid-connected wind turbines can be improved by employing flexible AC transmission systems (FACTS) devices. In this article, considering single-phase and two-phase faults and in the presence and absence of a static synchronous series compensator (SSSC), the performance of a 9 MW wind turbine based on SCIG and DFIG has been investigated, at the point of common connection (PCC). To evaluate the voltage stability of the studied system, a voltage stability index (VSI) is used. The obtained simulation results show that in the case of two-phase fault in which the system variables experience some oscillations, SSSC causes the oscillations to be damped faster and as a result, the stability of the system is improved. In particular, the oscillations for the wind turbine voltage, reactive power and active power in the presence of SSSC, are damped out faster in about 0.3, 0.5 and 0.6 seconds, respectively. All simulations are performed in MATLAB/Simulink software. **Keywords:** Wind turbine, squirrel cage induction generator, doubly-fed induction generator, FACTS, SSSC, power system stability

## 1- مقدمه

امروزه با توجه به رو به پایان بودن سوخت‌های فسیلی و تلاش برای کاهش استفاده از این نوع منابع انرژی، توجه اغلب کشورها به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر معطوف شده است [1]. انرژی باد به سرعت به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر پاک و بدون آلودگی در سراسر جهان در سال‌های اخیر توسعه یافته است و توجه گسترده‌ای را در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی به خود جلب کرده است. انتظار می‌رود در آینده هم توربین‌های بادی بیشتری به سیستم‌های برق متصل شوند. توربین‌های بادی شامل دو نوع ژنراتور القایی با سرعت ثابت و ژنراتور القایی سرعت متغیر هستند. ژنراتورهای القایی معمولاً در انتهای باس ضعیف یک شبکه یا در شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند و جریان راکتیو زیادی را در هنگام اختلالاتی مانند خطاها می‌کشند. در نتیجه، تحت این شرایط ولتاژ پایانه و توان خروجی الکتریکی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، در حالی که ممکن است گشتاور مکانیکی همچنان به توربین بادی اعمال شود و سرعت رتور افزایش یابد [1, 2].

پس از رفع خطا، ژنراتور برای بازیابی ولتاژ به توان راکتیو نیاز دارد، اما این توان راکتیو باید توسط شبکه تامین شود که به نوبه خود باعث افت ولتاژ می‌شود. بنابراین ممکن است ولتاژ ترمینال ژنراتور قابل بازیابی نباشد. اگر بتوان ولتاژ را بازیابی کرد و سرعت ژنراتور خیلی زیاد نباشد، امکان بازیابی گشتاور وجود دارد و توربین بادی می‌تواند سرانجام به عملکرد عادی خود ادامه دهد. در غیر این صورت ژنراتور به شتاب گرفتن ادامه خواهد داد و سرعت رتور و مصرف توان راکتیو افزایش می‌یابد و این امر موجب می‌شود ولتاژ ترمینال بیشتر کاهش یابد. اگر سرعت رتور از مقدار بحرانی مشخصی عبور کند، مجموعه ژنراتور ناپایدار شده و در نتیجه لازم است ژنراتور توسط دستگاه‌های حفاظتی از شبکه خارج شود [1, 3]. اما هنگامی که مقدار زیادی توان توسط ژنراتورهای بادی تامین می‌شود، این ژنراتورها باید به شبکه متصل بمانند تا سیستم پایداری خود را حفظ کند. بنابراین، پایداری مسئله مهمی است و اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده است [4]. یک راه حل برای مواجهه با این مسئله، استفاده از سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر<sup>1</sup> (FACTS) می‌باشد. عناصر FACTS را می‌توان برای اهداف مختلفی از جمله تنظیم ولتاژ، کاهش تلفات، تثبیت ولتاژ و بهبود پایداری گذرا و پایداری دینامیکی مورد استفاده قرار داد [5, 6]. هدف اصلی استفاده از FACTS در توربین‌های بادی متصل به شبکه، بهبود پایداری سیستم قدرت است.

در مرجع [7] بهبود عملکرد مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی قفس سنجایی<sup>2</sup> (SCIG) همراه با جبران‌کننده استاتیکی توان راکتیو<sup>3</sup> (SVC) و جبران‌کننده سنکرون استاتیکی<sup>4</sup> (STATCOM)، تحت شرایط مختلف سرعت باد و خطا مورد بررسی قرار گرفته است. به طور مشابه در مرجع [8] نویسندگان تأثیر توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه<sup>5</sup> (DFIG) را بر روی شبکه قدرت تحت سرعت‌های متغیر باد و خطاهای مختلف تحلیل کرده‌اند. مرجع [9]، تأثیر یک مزرعه بادی شامل 30 توربین بادی با توان دو مگاوات آمپری را در سیستم 14 شینه بررسی نموده است. خطای سه‌فاز در

یک شین اعمال شده و نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مزرعه بادی باعث بهبود پایداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود.

در مراجع [10, 11]، اثرات STATCOM و SVC بر پایداری ولتاژ یک مزرعه بادی مبتنی بر DFIG، در نقطه اتصال مشترک<sup>6</sup> (PCC) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که پس از وقوع خطا، STATCOM زمان بازیابی ولتاژ را نسبت به SVC کاهش می‌دهد و انتخابی اقتصادی‌تر می‌باشد. مرجع [12]، به بررسی یک مزرعه بادی با سرعت ثابت متصل به STATCOM تحت شرایط خطای شبکه با هدف افزایش پایداری ولتاژ سیستم در شرایط گذرا و مانا پرداخته است. مرجع [13]، پایداری یک مزرعه بادی مبتنی بر DFIG را با حضور پایدارساز سیستم قدرت<sup>7</sup> (PSS) و جبران‌کننده سری سنکرون استاتیکی<sup>8</sup> (SSSC)، در سیستم تست 14 شینه مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. مرجع [14]، به بررسی اثرات STATCOM بر توربین بادی SCIG در شرایط عادی و نیز در شرایط خطا پرداخته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که STATCOM می‌تواند ولتاژ را در نقطه اتصال مشترک بین مزرعه بادی و شبکه در حالت عادی و در شرایط خطا تنظیم نماید. همچنین می‌تواند توان اکتیو را در شرایط خطای اتصال کوتاه تامین کند.

هدف از این مقاله بررسی اثرات کنترل‌کننده SSSC بر روی توربین‌های بادی SCIG و DFIG متصل به شبکه است. شبکه‌های مورد مطالعه در این مقاله با استفاده از نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، می‌توان نتیجه گرفت که خطاهای تک‌فاز و دوفاز در PCC تأثیر قابل توجهی بر این دو توربین بادی خواهند داشت و SSSC قادر است پایداری سیستم را افزایش داده و باعث بهبود عملکرد سیستم شود. لازم به ذکر است که با وجود آنکه عملکرد شبکه‌های مورد مطالعه با در نظر گرفتن خطای سه‌فاز هم مورد بررسی قرار گرفته است، ولی به دلیل محدودیت تعداد صفحات، نتایج مربوطه در این مقاله ارائه نشده است.

ساختار مقاله به صورت زیر می‌باشد. بخش 2 ساختار و مدل‌سازی توربین بادی مبتنی بر SCIG و DFIG را تشریح می‌کند. بخش 3 پیکربندی SSSC را توضیح می‌دهد. بخش 4 شاخص پایداری ولتاژ را مورد بحث قرار می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان پایداری ولتاژ سیستم را ارزیابی نمود. سیستم تست مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی در بخش 5 مورد بحث قرار گرفته است. سرانجام در بخش 6 نتایج حاصل از این مقاله ارائه شده است.

## 2- توربین بادی

در توربین‌های بادی می‌توان از ژنراتورهای با سرعت ثابت و یا ژنراتورهای با سرعت متغیر استفاده نمود. در ادامه این دو نوع توربین بادی که در این مقاله استفاده شده اند، به طور مختصر توضیح داده می‌شوند [15].

### 2-1- توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی قفس سنجایی

تاکنون ژنراتور القایی قفس سنجایی به دلیل سادگی ساختمان، راندمان بالا و همچنین نیاز لندک به تعمیر و نگهداری، انتخابی متداول در مزارع بادی بوده اند. شکل (1) ژنراتور القایی قفس سنجایی متصل به شبکه را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Flexible AC transmission systems (FACTS)

<sup>2</sup> Squirrel cage induction generator (SCIG)

<sup>3</sup> Static var compensator (SVC)

<sup>4</sup> Static synchronous compensator (STATCOM)

<sup>5</sup> Doubly-fed induction generator (DFIG)

<sup>6</sup> Point of common connection (PCC)

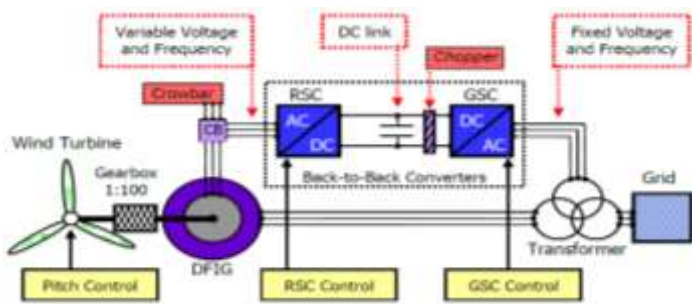
<sup>7</sup> Power system stabilizer (PSS)

<sup>8</sup> Static synchronous series compensator (SSSC)

$$Q_s = \left(\frac{3}{2}\right) (V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \quad (11)$$

2-2- توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه

شکل (2) توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه متصل به شبکه را نشان می‌دهد. در DFIG سیم‌پیچ استاتور مستقیماً به شبکه متصل می‌باشد و سیم‌پیچ رتور از طریق حلقه‌های لغزان به یک مبدل وصل می‌شود. توان الکتریکی مبدل حدوداً 20 تا 30 درصد کل توان الکتریکی ژنراتور است. یک DFIG با یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ به شبکه متصل می‌شود که در آن رتور از سیم‌پیچ سوم و از طریق یک مبدل ولتاژ پشت به پشت تغذیه می‌شود. توان خروجی از طریق دو سیم‌پیچ دیگر ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ از استاتور به شبکه منتقل می‌شود. در واقع DFIG می‌تواند حداکثر توان را از توربین بادی استخراج کرده و توان راکتیو انتقال یافته به شبکه برق را با هدف کنترل ولتاژ شبکه بدون توجه به سرعت باد تنظیم نماید [19].



شکل 2 توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه

مجموع معادلات (12) برای مدل‌سازی ریاضی DFIG استفاده می‌شود [19, 18]:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pl_s & 0 & pl_{ms} \cos \theta_r & -pl_{ms} \sin \theta_r \\ 0 & r_s + pl_s & pl_{ms} \sin \theta_r & pl_{ms} \cos \theta_r \\ pl_{ms} \cos \theta_r & pl_{ms} \sin \theta_r & r'_r + pl'_r & 0 \\ -pl_{ms} \sin \theta_r & pl_{ms} \sin \theta_r & 0 & r'_r + pl'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (12)$$

توان اکتیو و توان راکتیو خروجی رتور توسط روابط (13) و (14) محاسبه می‌شوند:

$$P_r = \left(\frac{3}{2}\right) (V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \quad (13)$$

$$Q_r = \left(\frac{3}{2}\right) (V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr}) \quad (14)$$

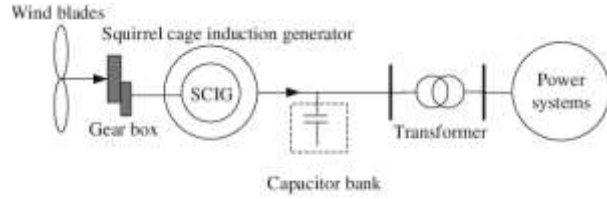
همچنین روابط مربوط به توان مکانیکی و توان الکتریکی خروجی استاتور DFIG چنین می‌باشند [19]:

$$P_m = T_m \omega_r \quad (15)$$

$$P_s = T_{em} \omega_s \quad (16)$$

3- جبران کننده سری سنکرون استاتیکی

یک SCIG مستقیماً به شبکه متصل می‌شود و اغلب با سرعت ثابت کار می‌کند، در نتیجه این نوع توربین بادی معمولاً یک سیستم توربین بادی با سرعت ثابت هم نامیده می‌شود [16].



شکل 1 توربین بادی سرعت ثابت مجهز به ژنراتور القایی قفس سنجایی

توان مکانیکی توربین بادی از رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (1)$$

که در آن  $C_p$  ضریب توان،  $\rho$  چگالی هوا ( $kg/m^3$ ),  $r$  شعاع توربین ( $m$ ),  $V$  سرعت باد ( $m/s$ ) و  $P_{Wind}$  توان باد ( $W$ ) می‌باشد.

به طور کلی می‌توان معادلات دیفرانسیل مربوط به ژنراتور القایی را به صورت زیر نوشت. تمام مقادیر استاتور و رتور در چارچوب محورهای  $d$  و  $q$  هستند [17].

$$V_{sd} = -R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + \frac{1}{\omega_B} P \psi_{sd} \quad (2)$$

$$V_{sq} = -R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + \frac{1}{\omega_B} P \psi_{sq} \quad (3)$$

$$V_{rd} = -R_r i_{rd} - s \omega_s \psi_{rq} + \frac{1}{\omega_B} P \psi_{rd} \quad (4)$$

$$V_{rq} = -R_r i_{rq} + s \omega_s \psi_{rd} + \frac{1}{\omega_B} P \psi_{rq} \quad (5)$$

در روابط فوق  $R_s$  و  $R_r$  به ترتیب مقاومت‌های رتور و استاتور،  $i_{sq}$  و  $i_{sd}$  جریان‌های انتقال یافته استاتور به محورهای  $d$  و  $q$ ،  $i_{rq}$  و  $i_{rd}$  جریان‌های انتقال یافته رتور به محورهای  $d$  و  $q$ ،  $V_d$  و  $V_q$  ولتاژهای انتقال یافته محورهای  $d$  و  $q$ ،  $\omega_s$  سرعت سنکرون و  $\omega_B$  فرکانس پایه سیستم است که برابر با فرکانس سنکرون یعنی  $\omega_B = 2\pi f$  می‌باشد.  $p$  نیز نشان دهنده عملگر مشتق ( $d/dt$ ) است. همچنین گشتاور الکترومغناطیسی  $T_e$  را می‌توان با رابطه (6) به دست آورد:

$$T_e = L_m (i_{sd} i_{rq} - i_{sq} i_{rd}) \quad (6)$$

معادلات بخش مکانیکی سیستم هم چنین هستند [17]:

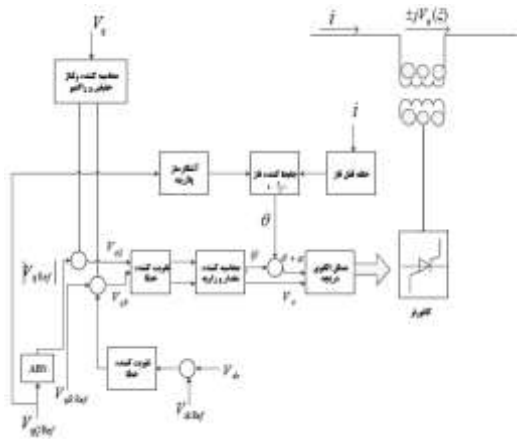
$$2H_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - K_s \theta_s \quad (7)$$

$$2H_G \frac{d\omega_G}{dt} = K_s \theta_s - T_e \quad (8)$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_B - (\omega_M - \omega_G) \quad (9)$$

در روابط فوق،  $H_m$  و  $H_G$  به ترتیب ثابت اینرسی توربین بادی و ثابت اینرسی رتور ژنراتور می‌باشند.  $\omega_G$  و  $\omega_M$  به ترتیب سرعت توربین بادی و ژنراتور را نشان می‌دهند.  $K_s$  ضریب سختی محور رتور و  $\theta_s$  زاویه چرخش محور رتور می‌باشد. توان اکتیو و راکتیو استاتور را می‌توان چنین محاسبه نمود [18]:

$$P_s = \left(\frac{3}{2}\right) (V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \quad (10)$$



شکل 4 ساختار کنترلی داخلی SSSC

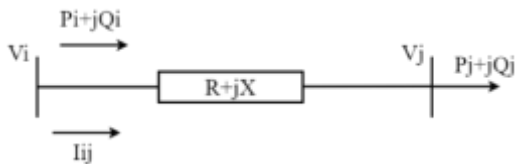
#### 4- شاخص پایداری ولتاژ

از شاخص‌های پایداری ولتاژ (VSI) می‌توان برای تعیین میزان نزدیکی یک سیستم قدرت به ناپایداری ولتاژ استفاده نمود [22]. در این مقاله از یک شاخص پایداری ولتاژ استفاده شده است که در مرجع [23] طرح شده است. یک خط انتقال در یک سیستم قدرت چند شینه را مطابق شکل (5) در نظر بگیرید که در آن شین 1 شین فرستنده و شین 2 شین بار است.

با در نظر گرفتن طرز نمایش نشان داده شده در شکل (5)، شاخص پایداری مورد استفاده در این مقاله چنین به دست می‌آید [23]:

$$VSI = \frac{|V_i|^2 \sqrt{[(P_i - |I|^2 R)^2 + (Q_i - |I|^2 X)^2] (R^2 + X^2)}}{2(P_i X - Q_i R)^2} - \frac{|V_i|^2 [(P_i - |I|^2 R)R + (Q_i - |I|^2 X)X]}{2(P_i X - Q_i R)^2} \quad (17)$$

که در آن،  $V_i$  ولتاژ شین 1،  $I$  جریان عبوری از خط انتقال،  $R$  مقاومت خط انتقال،  $X$  راکتانس خط انتقال،  $P_i$  توان اکتیو شین 1 و  $Q_i$  توان راکتیو شین 1 می‌باشد.



شکل 5 مدل معادل یک سیستم انتقال دو شینه

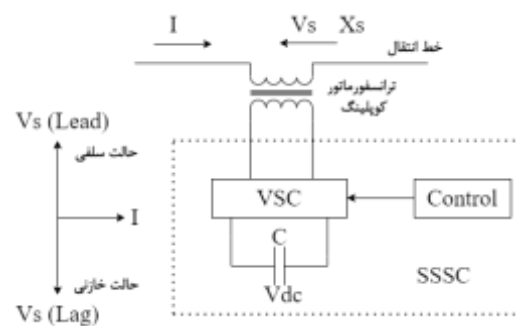
با توجه به رابطه (17) می‌توان بیان نمود که VSI، یعنی شاخص پایداری مورد نظر دارای ویژگی‌های زیر است:

- هنگامی که VSI بزرگتر از 1 باشد، خط انتقال در محدوده انتقال توان خود قرار دارد.
- هنگامی که VSI برابر با 1 باشد، خط انتقال به حداکثر قابلیت انتقال توان خود می‌رسد.
- هنگامی که VSI کمتر از 1 باشد، حد حداکثر توان قابل انتقال نقض شده و ولتاژ ناپایدار می‌شود.

#### 5- سیستم تست و نتایج شبیه‌سازی

به منظور کنترل پخش توان و نیز تنظیم ولتاژ در یک خط انتقال، لازم است از جبران‌کننده‌های قابل کنترل استفاده نمود. برای جبران‌سازی خطوط انتقال ادوات FACTS بسیار مناسب هستند. در بین عناصر مختلف FACTS، SSSC یک جبران‌کننده از نوع سری و مبتنی بر منبع ولتاژ قابل کنترل می‌باشد. مدل پایه SSSC در شکل (3) نشان داده شده است. یک SSSC جبران‌سازی خازنی یا القایی مستقل از جریان خط را ارائه می‌دهد و قادر به جبران توان راکتیو سیستم قدرت می‌باشد. خروجی SSSC یک ولتاژ تزریقی سری است که جریان خط را 90 درجه پیش‌فاز و یا پس‌فاز در نظر می‌گیرد، بنابراین یک راکتانس القایی و یا خازنی قابل کنترل را شبیه‌سازی می‌کند. یک SSSC برای کاهش امپدانس خط و در حقیقت به منظور افزایش قابلیت انتقال توان اکتیو در سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد [20، 21].

طرح کنترل کننده داخلی SSSC در شکل (4) نشان داده شده است. ورودی‌های این کنترل کننده عبارتند از: جریان خط  $i$  و ولتاژ جبران‌سازی تزریقی شده  $V_q$  و ولتاژ مرجع  $V_{qRef}$ . سیستم کنترلی مذکور از طریق یک حلقه قفل فاز (PLL)، با جریان خط سنکرون می‌شود. این حلقه قفل فاز، پس از جابجایی فاز به اندازه  $\pm \frac{\pi}{2}$ ، سیگنال اصلی سنکرون‌سازی  $\theta$  را تامین می‌کند. جابجایی کننده فاز از طریق خروجی آشکارساز پلاریته، که تعیین می‌کند آیا ولتاژ مرجع  $V_{qRef}$  مثبت (خازنی) یا منفی (القایی) است، عمل می‌کند. ولتاژ جبران‌سازی  $V_q$  با یک حلقه بسته ساده چنین کنترل می‌شود: اندازه مطلق مرجع  $V_{qRef}$  با مقدار اندازه‌گیری شده ولتاژ تزریقی شده  $V_q$  مقایسه می‌شود و سپس تفاوت (خطای) حاصل تقویت شده و به عنوان زاویه تصحیح  $\Delta\alpha$  با سیگنال سنکرون سازی  $\omega t = \theta$  جمع می‌شود. با توجه به پلاریته  $\Delta\alpha$ ، زاویه  $\theta$  و در نتیجه سیگنال‌های راه‌انداز درجه‌کانورتر دارای تقدم و یا تاخر خواهند بود. بنابراین ولتاژ جبران‌سازی  $V_q$  از وضعیت ابتدایی خود، نسبت به جریان موجود خط به اندازه  $+\frac{\pi}{2}$  یا  $-\frac{\pi}{2}$ ، جابجایی فاز خواهد داشت. این‌جا به جایی فاز باعث می‌شود کانورتر توان حقیقی را برای خازن dc از سیستم ac جذب نماید و یا بالعکس، توان حقیقی را از خازن dc به سیستم ac تزریق کند [18].



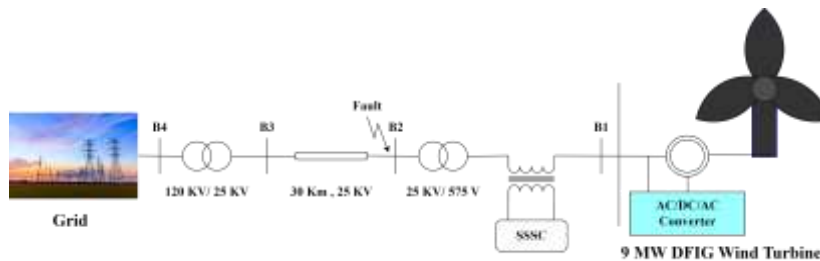
شکل 3 مدل پایه SSSC

دوفاز و سه‌فاز و در حضور و یا در عدم حضور SSSC مورد مطالعه قرار گرفته است.

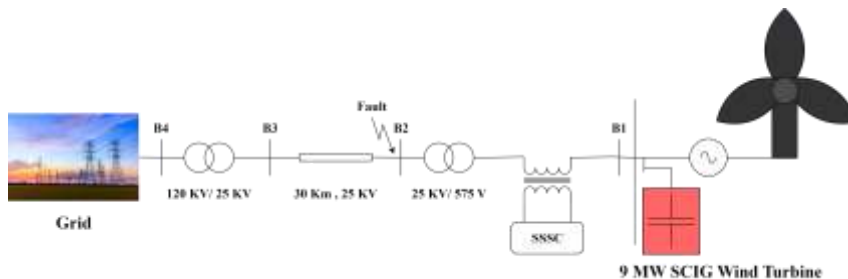
باید توجه داشت که بررسی عملکرد یک سیستم قدرت هنگامی که تحت تاثیر انواع خطاها قرار می‌گیرد، بسیار مهم است. با اعمال خطا در سیستم می‌توان از پایدار ماندن سیستم به طور نسبی اطمینان حاصل نمود. به همین منظور لازم است رفتار سیستم را بعد از وقوع انواع اغتشاش‌ها شامل خطاهای سه‌فاز، تک‌فاز و نیز دوفاز، مورد بررسی قرار داد. در این مقاله برای تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده، فرض شده است که خطاها در زمان 1 ثانیه پس از زمان شروع شبیه‌سازی اتفاق می‌افتند و سپس برای مدت 9 سیکل ادامه ادامه می‌یابند. همچنین علی‌رغم مطالعه و بررسی، نتایج شبیه‌سازی مربوط به خطای سه‌فاز در مقاله حاضر ذکر نشده است.

در این مقاله از دو توربین بادی مبتنی بر SCIG و DFIG متصل به شبکه، استفاده شده است. در شکل (6) نیروگاه بادی DFIG متصل به شبکه نشان داده شده است. در سیستم شکل (6) از یک توربین بادی 9 مگاواتی برای تولید 9 مگاوات توان الکتریکی تحت ولتاژ 575 ولت در شین B1 و در سرعت باد برابر 9 متر بر ثانیه استفاده شده است. توربین بادی DFIG به یک مبدل AC/DC/AC متصل است. همچنین توربین بادی مورد اشاره به یک سیستم توزیع 25 کیلوولتی متصل می‌باشد و از طریق یک فیدر 25 کیلوولتی 30 کیلومتری، توان الکتریکی را به یک شبکه 120 کیلوولتی منتقل می‌نماید.

در شکل (7)، سیستم مربوطه به نیروگاه بادی SCIG نشان داده شده است. در سیستم شکل (7) از یک توربین بادی 9 مگاواتی استفاده شده است. توربین بادی SCIG به یک بانک خازنی 400 کیلوواری متصل است. توربین‌های بادی مورد مطالعه در این مقاله به یک SSSC نزدیک به باس B1 متصل می‌باشند. در این مقاله توان خروجی، توان راکتیو و ولتاژ در باس B1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. عملکرد سیستم‌های مورد مطالعه تحت شرایط خطای تک‌فاز،



شکل 6 نیروگاه بادی مبتنی بر DFIG



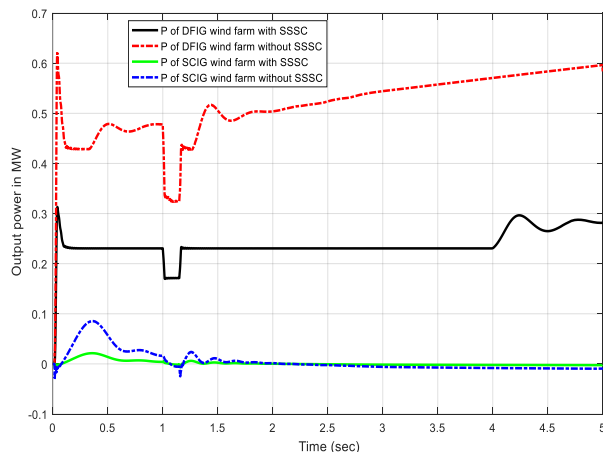
شکل 7 نیروگاه بادی مبتنی بر SCIG

حقیقت DFIG نسبت به SCIG دارای عملکرد بهتری در هنگام خطاهای شبکه است.

باید توجه داشت که DFIG از طریق مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شود. این موضوع سبب می‌شود DFIG بتواند توان خروجی خود را کنترل کند و در مقایسه با SCIG که به طور مستقیم به شبکه متصل می‌شود، انعطاف پذیرتر و قابل کنترل‌تر باشد. مطابق منحنی مشکی در شکل (8)، نیروگاه DFIG متصل به SSSC نوسانات کمتری را تجربه می‌کند که این موضوع به دلیل عملکرد SSSC می‌باشد. علاوه بر آن، مبدل الکترونیک قدرت در DFIG به آن اجازه می‌دهد تا ولتاژ و فرکانس خود را کنترل نماید و از هماهنگی DFIG با شبکه و داشتن حداقل اعوجاج هارمونیکی، اطمینان حاصل نماید. این موضوع باعث بهبود کیفیت توان در DFIG می‌شود. اما SCIG به دلیل داشتن سرعت

#### 5-1- تاثیر خطا بر توان خروجی توربین بادی

در شکل (8)، تاثیر خطای تک‌فاز بر توان اکتیو خروجی توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC نشان داده شده است. در لحظه اعمال خطای تک‌فاز در ثانیه 1، توان اکتیو خروجی DFIG دارای نوساناتی است که بسیار ناچیز می‌باشد و بعد از 9 سیکل که خطا رفع می‌شود، به حالت پایدار می‌رسد. نوسانات توان اکتیو در توربین بادی DFIG مجهز به SSSC کمتر از نوسانات توان اکتیو در توربین بادی بدون SSSC می‌باشد. بعد از وقوع خطای تک‌فاز، سطح توان اکتیو توربین بادی SCIG در نبود SSSC بالاتر از زمانی است که SSSC به توربین بادی متصل است. همان‌طور که در شکل (8) نشان داده شده است، در حضور SSSC این نوسانات قبل و بعد از خطا کاهش می‌یابند. در



شکل 9 تاثیر خطای دوفاز بر توان اکتیو خروجی توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC

به ازای خطای دوفاز و در دوره حین خطا، DFIG توانسته است به سرعت توان خروجی خود را کاهش داده و عملکرد پایدار خود را حفظ نماید. این امر توسط منحنی مشکلی در شکل (9) قابل مشاهده است. اما از منحنی‌های سبز و آبی می‌توان نتیجه گرفت که SCIG افت ناگهانی در توان خروجی خود را تجربه نموده است. در حقیقت این امر باعث ناپایداری سیستم و وارد آمدن آسیب به سیستم شده است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با وقوع خطای دوفاز در نیروگاه SCIG، فاز آسیب دیده با افت ناگهانی ولتاژ مواجه می‌شود و این امر باعث عدم تعادل در سیستم می‌شود. این عدم تعادل منجر به نوسان گشتاور در روتور ژنراتور القایی شده و موجب کاهش توان خروجی ژنراتور می‌شود. همان‌طور که در شکل (9) با منحنی‌های آبی و سبز قابل مشاهده است، توان خروجی در سیستم به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش قابل توجهی در آن ایجاد شده است. این موضوع نشان می‌دهد که SSSC نتوانسته است پایداری نیروگاه SCIG را بهبود ببخشد.

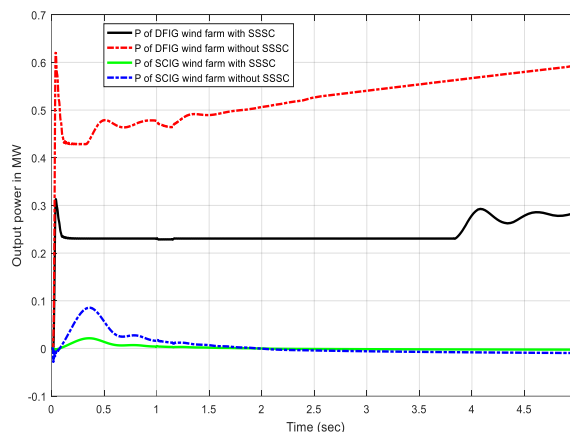
#### 5-2- تاثیر خطا بر ولتاژ نیروگاه بادی

بعد از وقوع خطا در سیستم، SSSC اطلاعاتی را در مورد وضعیت خطا از طریق رله‌های محافظ و یا سایر مکانیسم‌های تشخیص خطا، دریافت می‌کند. این رله‌ها خطا را تشخیص داده و سیگنال‌های لازم را به SSSC ارسال می‌کنند. SSSC بلافاصله به انحرافات ولتاژ ناشی از خطا پاسخ داده و سعی می‌کند با تنظیم و کنترل ولتاژ خط انتقال متصل به نیروگاه، باعث بهبود عملکرد سیستم شود.

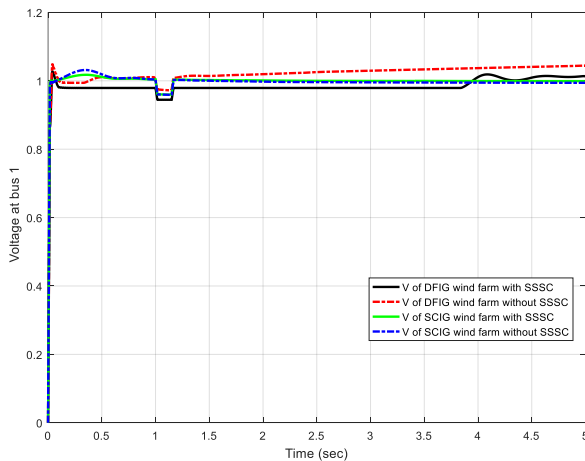
شکل (10) تاثیر خطای تک‌فاز را بر ولتاژ توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، سطح ولتاژ DFIG در حضور SSSC کاهش می‌یابد اما SSSC قادر است نوسانات بوجود آمده را کاهش دهد. در نبود SSSC، ولتاژ DFIG در اثر خطای تک‌فاز سریعاً به حالت ماندگار می‌رسد ولی از 1 پرینیت بیشتر می‌شود. در هنگام وقوع خطای تک‌فاز در ثانیه 1، وقتی که توربین بادی SCIG مجهز به SSSC متصل نیست، ولتاژ تا پایان شبیه‌سازی سطح بالاتری نسبت به هنگامی که SSSC به توربین بادی متصل است، دارد. کاهش شدیدی در ولتاژ مشاهده

ثابت و قابلیت کنترل محدود بر توان خروجی خود، نوساناتی را در ولتاژ و فرکانس ایجاد می‌کند. منحنی سبز در شکل (8) نشان می‌دهد که حضور SSSC باعث بهبود توان خروجی نیروگاه SCIG نشده است. در واقع سرانجام توان خروجی ژنراتور صفر شده و ژنراتور از شبکه خارج شده است. علاوه بر آن، از منحنی آبی در شکل (8) می‌توان نتیجه گرفت که این موضوع هنگامی که SSSC به سیستم متصل نیست نیز رخ می‌دهد و ژنراتور بادی به دلیل صفر شدن توان خروجی خود، از شبکه جدا می‌شود.

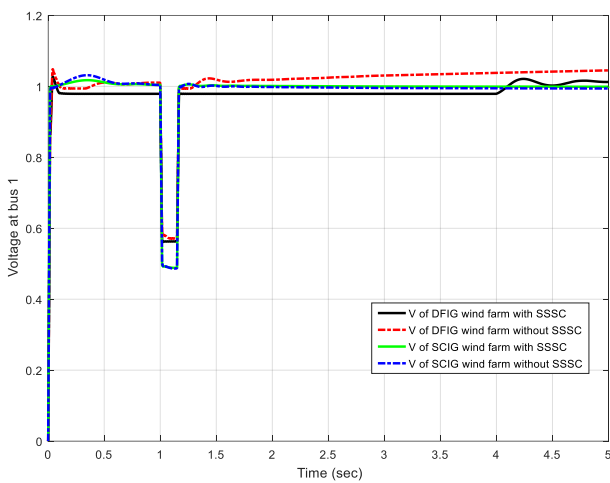
با توجه به شکل (9) که تاثیر خطای دوفاز را بر توان اکتیو توربین‌های بادی در حضور و بدون حضور SSSC نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات توان کمی بیشتر شده است ولی در سرانجام بعد از رفع خطا، به حالت پایدار رسیده‌اند. در خطای دوفاز، توربین بادی DFIG مجهز به SSSC همچنین نوساناتی کمتری را نسبت به توربین بادی بدون SSSC تجربه می‌نماید. از منحنی مشکلی در شکل (9) همچنین می‌توان مشاهده نمود که پس از وقوع خطای دوفاز و در حضور SSSC، نوسانات ایجاد شده در توان اکتیو توربین بادی، حدوداً 0.6 ثانیه سریع‌تر میرا می‌شود. در هنگام وقوع خطای دوفاز تا زمان 1.15 ثانیه از شروع شبیه‌سازی، در حضور SSSC توان اکتیو SCIG بیشتر است اما پس از این زمان، توان مذکور کاهش پیدا نموده و تا پایان زمان شبیه‌سازی به صفر می‌رسد. در نتیجه SCIG غیر فعال شده و سیستم حفاظتی آن را از شبکه جدا می‌کند. در واقع توربین بادی نوسانات کمتری در حضور SSSC تجربه می‌کند.



شکل 8 تاثیر خطای تک‌فاز بر توان اکتیو خروجی توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC



شکل 10 تاثیر خطای تکفاز بر ولتاژ توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC



شکل 11 تاثیر خطای دوفاز بر ولتاژ توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC

### 3-5- تاثیر خطا بر توان راکتیو نیروگاه بادی

شکل (12) تاثیر حضور و عدم حضور SSSC را بر عملکرد توربین‌های بادی در هنگام وقوع خطای تکفاز، نشان می‌دهد. از شکل (12) مشاهده می‌شود که توان راکتیو DFIG در حضور SSSC کاهش می‌یابد اما در حضور SSSC، توان راکتیو سریع‌تر به حالت پایدار می‌رسد و نوسانات کمتری را تجربه می‌نماید. نوسانات توربین بادی SCIG توسط SSSC کاهش می‌یابد و سریع‌تر به حالت پایدار می‌رسد. پس از رفع خطا، مقدار توان راکتیو در حضور SSSC به  $-0.04$  می‌رسد در حالی که در نبود SSSC به  $-0.16$  می‌رسد. مطابق منحنی آبی رنگ در شکل (12)، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که SSSC به نیروگاه SCIG متصل نیست، پس از وقوع خطا توان راکتیو بیشتری از شبکه دریافت می‌شود و این امر به افت ولتاژ در سیستم منجر می‌شود.

اما در صورت حضور SSSC، بخشی از توان راکتیو مورد نیاز توسط این جبران‌کننده تامین می‌شود و این به معنی آن خواهد بود که مقدار توان دریافتی

نمی‌شود و مقدار ولتاژ در حضور SSSC برابر 1 پریونیت و در نبود SSSC برابر 0.97 پریونیت می‌شود.

همان‌طور که در شکل (10) دیده می‌شود، SSSC قادر است با تزریق یک ولتاژ سری به سیستم، باعث کاهش اثر خطای تکفاز بر عملکرد سیستم شود. در حقیقت SSSC با تغییر راکتانس خط انتقال متصل به خود، باعث تغییر در میزان توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال می‌شود و این امر می‌تواند منجر به بهبود پایداری سیستم شود. در واقع SSSC باعث بهبود پایداری ولتاژ سیستم می‌شود و خطر آسیب رسیدن به ژنراتور القایی را کاهش می‌دهد. SSSC همچنین می‌تواند میرایی سیستم را افزایش داده و نوسانات ایجاد شده بعد وقوع خطا را کاهش دهد. در شکل (10) مشاهده می‌شود که در غیاب SSSC در نیروگاه DFIG و مطابق منحنی قرمز، در دوره پس از رفع خطا ولتاژ بیشتر از 1 پریونیت می‌شود. این امر موجب می‌شود در نبود SSSC، در دوره پس از خطا سیستم دچار ناپایداری ولتاژ شود. همچنین افت ولتاژ ناشی از خطا می‌تواند باعث ایجاد نوساناتی در ولتاژ سیستم و یا خارج شدن ولتاژ از محدوده مجاز خود شود. این امر می‌تواند بر DFIG و سایر دستگاه‌های متصل به سیستم تأثیر بگذارد و به طور بالقوه باعث ناپایداری ولتاژ سیستم شود.

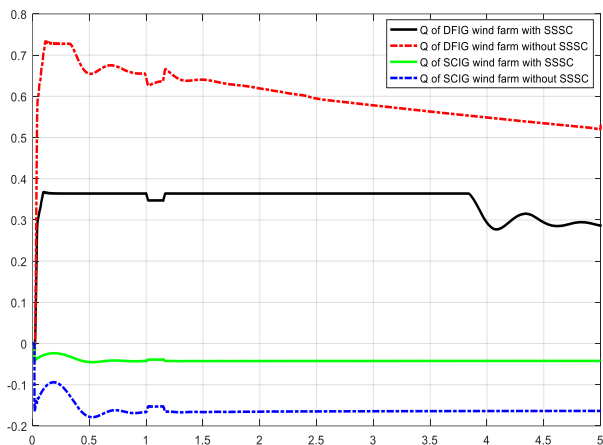
شکل (11) اثر خطای دوفاز را بر ولتاژ توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC نشان می‌دهد. در حضور SSSC، نوسانات توربین بادی DFIG در هنگام خطا کمتر است. با وقوع خطای دوفاز و در نبود SSSC، ولتاژ توربین بادی SCIG به  $0.49$  کاهش می‌یابد و پس از رفع خطا، مجدداً به همان مقدار 1 پریونیت می‌رسد. به طور مشابه، در هنگام متصل بودن SSSC، ولتاژ توربین بادی SCIG از 1 به  $0.49$  کاهش می‌یابد و سپس در دوره بعد از رفع خطا به 1 پریونیت افزایش می‌یابد و تا پایان شبیه‌سازی در همین مقدار باقی می‌ماند. در حقیقت توربین بادی SCIG در حضور و در عدم حضور SSSC عملکرد مشابهی از خود نشان داده است. علاوه بر این، از منحنی مشکی در شکل (11) می‌توان مشاهده نمود که پس از وقوع خطای دوفاز و در حضور SSSC، نوسانات ایجاد شده در ولتاژ توربین بادی، حدوداً 0.3 ثانیه سریع‌تر میرا می‌شود.

برای خطای دوفاز و در دوره حین خطا، عدم تعادل قابل توجهی در سیستم ایجاد می‌شود. این امر باعث تغییراتی در ولتاژهای سیستم شده و عملاً ولتاژ در فازهای آسیب دیده کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (11) توسط منحنی مشکی قابل مشاهده است، SSSC ولتاژ خط انتقال را با تزریق ولتاژ تنظیم می‌نماید و باعث پایداری سیستم می‌شود. SSSC موجب می‌شود تا سطح ولتاژ در محدوده قابل قبول خود حفظ شود. اما همان‌طوری که در منحنی قرمز شکل (11) قابل مشاهده است، در دوره پس از رفع خطا و در غیاب SSSC، ژنراتور DFIG ولتاژ بزرگتر از 1 پریونیت را تجربه می‌کند و این امر باعث ناپایداری ولتاژ سیستم در دوره بعد از رفع خطا می‌شود.

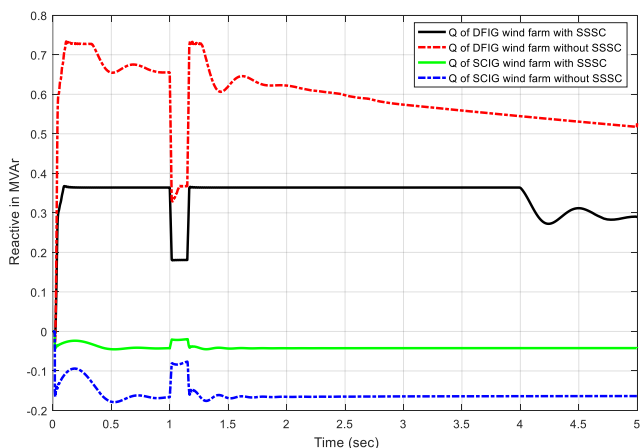
ژنراتور استفاده می‌شود و می‌تواند به جبران سازی افت ولتاژ ناشی از خطا کمک نماید.

#### 5-4- بررسی شاخص پایداری ولتاژ

با اعمال خطای تک‌فاز و خطای دوفاز در دو سیستم تست و به ازای زمان‌های مختلف در شبیه سازی، مقدار شاخص پایداری ولتاژ (VSI) محاسبه شد. از جدول (1) که نتایج حاصل را نشان می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که مقدار شاخص پایداری ولتاژ به ازای هر دو نوع خطا یکسان است. همچنین از جدول (1) می‌توان مشاهده کرد که DFIG در حضور و در عدم حضور SSSC، هم در دوره خطا و هم در دوره پس از رفع خطا، عملکرد مشابهی از خود نشان می‌دهد و دارای پایداری ولتاژ قابل قبولی است. برای خطا تک‌فاز، از زمان شروع شبیه‌سازی تا زمان 1.3 ثانیه از شبیه‌سازی، مقدار VSI کوچکتر از 1 می‌باشد که این امر نشان می‌دهد در این بازه زمانی، ولتاژ ناپایدار است. در حالی که از زمان 1.35 ثانیه از شبیه‌سازی تا پایان شبیه‌سازی، VSI بزرگتر از 1 می‌باشد که نشان دهنده آن است که خط انتقال در محدوده انتقال توان خود قرار دارد.



شکل 12 تاثیر خطای تک‌فاز بر توان راکتیو توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC



شکل 13 تاثیر خطای دوفاز بر توان راکتیو توربین‌های بادی در حضور و در عدم حضور SSSC

از شبکه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در حضور SSSC، توان راکتیو کمتری از شبکه جذب می‌شود و این امر از منحنی سبزرنگ در شکل (12) قابل مشاهده است. بعد از وقوع خطا، افت ناگهانی ولتاژ در سیستم رخ می‌دهد و عدم تعادل در توان‌های شبکه ایجاد می‌شود. در واقع به طور موقت توان راکتیو تولیدی توسط ژنراتور کاهش می‌یابد، زیرا توان راکتیو به ولتاژ سیستم بستگی دارد. در منحنی قرمز در شکل (12) دیده می‌شود که در نبود SSSC، نوسانات ایجاد شده پس از وقوع خطا منجر به کاهش قابل توجهی در توان راکتیو خروجی ژنراتور شده است. در نیروگاه DFIG، مبدل سمت شبکه می‌تواند توان راکتیو خود را مستقل از ژنراتور کنترل نماید و این امر سبب پشتیبانی ولتاژ در شبکه می‌شود. به عبارت دیگر، مبدل‌های DFIG و SSSC وظیفه تزریق توان راکتیو به شبکه را بر عهده دارند. همان‌طور که از منحنی مشکی در شکل (12) قابل مشاهده است، مبدل‌های مربوط به DFIG و SSSC، با کنترل توان راکتیو به میرایی نوسانات ایجاد شده در سیستم که به دلیل کاهش ولتاژ در دوره خطا، ایجاد شده اند، کمک می‌کنند.

شکل (13) تاثیر حضور و عدم حضور SSSC را در هنگام وقوع خطای دوفاز، بر توربین‌های بادی نشان می‌دهد. در شکل (13) دیده می‌شود که در زمان خطا، توان راکتیو DFIG کاهش شدیدی می‌یابد. در غیاب SSSC، توان راکتیو همچنان تغییراتی دارد اما در حضور SSSC، سریعاً بعد از رفع خطا به حالت پایدار خود می‌رسد. از منحنی مشکی در شکل (13) همچنین می‌توان مشاهده نمود که پس از وقوع خطای دوفاز و در حضور SSSC، نوسانات ایجاد شده در توان راکتیو توربین بادی، در حدود 0.5 ثانیه سریع‌تر میرا می‌شود. توان راکتیو SCIG نیز در نبود SSSC نوسانات شدیدی را تجربه می‌کند و مقدار توان راکتیو متناظر آن در لحظه وقوع خطا برابر  $-0.08$  و پس از رفع خطا برابر  $-0.16$  می‌باشد. این مقدار برای توربین بادی SCIG مجهز به SSSC در لحظه وقوع خطا برابر  $-0.02$  و پس از رفع خطا برابر  $-0.04$  است. می‌توان مشاهده نمود که نوسانات مذکور کاهش پیدا کرده و عملکرد SSSC قابل قبول بوده است. این موضوع نشان می‌دهد وقتی که SSSC به توربین بادی SCIG متصل نیست، توان راکتیو بیشتری از شبکه جذب می‌شود و این امر باعث افت ولتاژ می‌شود.

همان‌طوری که از منحنی مشکی در شکل (13) می‌توان مشاهده کرد، مبدل DFIG و SSSC با کنترل توان راکتیو سیستم، به میرایی نوسانات ایجاد شده به دلیل افت ولتاژ در دوره حین خطا، کمک کرده‌اند. این امر با مقایسه منحنی مشکی با منحنی قرمز در شکل (13) تایید می‌شود. در حقیقت در این حالت میرایی و پایداری سیستم افزایش یافته و خطر ناپایداری سیستم و یا آسیب رسیدن به تجهیزات سیستم، کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که در نیروگاه SCIG و مطابق منحنی سبزرنگ در شکل (13)، توان راکتیو مورد نیاز شبکه فقط توسط SSSC تامین می‌شود. بنابراین در صورت عدم حضور SSSC و مطابق منحنی آبی رنگ در شکل (13)، نیروگاه SCIG توان راکتیو مورد نیاز خود را از شبکه تامین نمی‌نماید و این موضوع باعث ناپایداری ولتاژ در سیستم می‌شود.

یکی از مزایای مهم DFIG نسبت به SCIG آن است که نیروگاه DFIG توانایی کنترل هر دو نوع توان اکتیو و توان راکتیو را توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت سمت شبکه و روتور خود، دارد. بنابراین حتی در هنگام خطا، توان راکتیو خروجی نیروگاه DFIG را می‌توان برای حفظ ولتاژ و پخش توان در سیستم تنظیم نمود. مبدل سمت روتور در DFIG برای کنترل توان راکتیو خروجی

DFIG متصل به SSSC اختلال قابل توجهی را برای خطای دوفاز تجربه کرد. این اختلال به دلیل نوسان شدید توان راکتیو تریقی شده در PCC توربین بادی DFIG بود که از SSSC می‌آمد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که نوسانات ایجاد شده در ولتاژ توربین بادی و در حضور SSSC، حدوداً 0.3 ثانیه سریع‌تر میرا می‌شوند که این امر موثر بودن استفاده از SSSC را تایید می‌نماید.

2. در این مقاله عملکرد یک توربین بادی 9 مگاواتی مبتنی بر SCIG در حضور و بدون حضور SSSC و با در نظر گرفتن خطاهای تک‌فاز و دوفاز مورد بررسی قرار گرفت. برای خطای تک‌فاز و در حضور SSSC، سطح توان اکتیو خروجی و ولتاژ پایین‌تر از زمانی بود که توربین بادی به SSSC متصل نبود، اما SSSC توانست نوسانات را کاهش دهد. توان راکتیو تریقی بیشتر از زمانی بود که SSSC به توربین بادی متصل نبود. برای خطای دوفاز، توان اکتیو نوسانات کمتری را در حضور SSSC تجربه کرد. مقدار افت ولتاژ نیز در حضور SSSC نسبت به هنگامی که SSSC حضور نداشت، کمتر بود. توان راکتیو نیز نوسانات کمتری را تجربه نمود و همچنین توانست سریع‌تر به حالت پایدار برسد.

3. یکی از مهم‌ترین عوامل ناپایداری ولتاژ، کمبود توان راکتیو در شبکه است. هرچند یک ژنراتور القایی با استفاده از توربین بادی انرژی الکتریکی تولید می‌کند، ولی از طرفی خود مصرف کننده توان راکتیو نیز می‌باشد. اما در هنگام وقوع خطا که نیاز به توان راکتیو بیشتر می‌شود، مصرف توان راکتیو ژنراتورهای القایی نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه این امر می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل ناپایداری ولتاژ در سیستم باشد. در چنین شرایطی، می‌توان با استفاده از SSSC به پایداری ولتاژ سیستم کمک کرد. در حقیقت با رشد روز افزون استفاده از انرژی باد و افزایش نیروگاه‌های بادی، نیاز به استفاده از جبران کننده‌های مانند SSSC هم بیشتر می‌شود.

از جدول (1) همچنین می‌توان مشاهده نمود که SCIG در حضور و در عدم حضور SSSC، برای خطای دوفاز و در دوره پس از رفع خطا، عملکرد مشابهی از خود نشان داده و دارای پایداری ولتاژ قابل قبولی است. از زمان شروع شبیه‌سازی تا زمان 1.35 ثانیه از شبیه‌سازی، این مقدار کوچکتر از 1 می‌باشد که نشان می‌دهد در این بازه زمانی، به دلیل وقوع خطا، ولتاژ ناپایدار است. اما از زمان 1.35 ثانیه تا پایان شبیه‌سازی، مقدار VSI بزرگتر از 1 می‌باشد که نشان می‌دهد خط انتقال در محدوده انتقال توان خود قرار دارد.

## 6- نتیجه‌گیری

یکی از مشخصات بارز انرژی باد نسبت به روش‌های سنتی تولید انرژی الکتریکی، نوسانات توان خروجی ژنراتورهای بادی به دلیل تغییرات سرعت باد و رفتار توربین بادی، می‌باشد. برای کاهش و یا از بین بردن این نوسانات می‌توان از عناصر FACTS در سیستم‌های قدرت استفاده نمود. در این مقاله اثر SSSC بر توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG و SCIG، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، می‌توان نتایج حاصل از این مقاله را چنین بیان نمود.

1. در این مقاله عملکرد یک توربین بادی 9 مگاواتی مبتنی بر DFIG در حضور و بدون حضور SSSC و پس از وقوع خطاهای تک‌فاز و دوفاز، مورد بررسی قرار گرفت. توربین بادی مبتنی بر DFIG و مجهز به SSSC، نوسانات کمتری در هنگام خطا تجربه کرد که این امر ناشی از عملکرد مناسب SSSC می‌باشد. برای خطاهای تک‌فاز و دوفاز و در حضور SSSC، سطح توان اکتیو خروجی DFIG پایین‌تر از زمانی بود که توربین بادی به SSSC متصل نبود. برای خطای دوفاز، نوسانات ایجاد شده در توان اکتیو خروجی DFIG، حدوداً 0.6 ثانیه سریع‌تر میرا شدند. این امر برای توان راکتیو توربین بادی نیز مشاهده شد. نوسانات توان راکتیو DFIG در حضور SSSC نسبت به زمانی که SSSC در شبکه وجود نداشت، حدوداً 0.5 ثانیه سریع‌تر میرا شدند. ولتاژ توربین بادی

## ضمایم

جدول 1 چند مقدار VSI پس از وقوع خطای تک‌فاز و خطای دوفاز

زمان (ثانیه) / توربین بادی	1.03	1.05	1.15	1.25	1.35	1.45	1.55	2.05
DFIG	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1
DFIG WITHOUT SSSC	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1
SCIG	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1
SCIG WITHOUT SSSC	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI < 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1	VSI > 1

جدول 2 پارامترهای توربین‌های بادی SCIG، DFIG، SSSC و خط انتقال سیستم مورد مطالعه

مقادیر(واحد)	خط انتقال	مقادیر(واحد)	SSSC	مقادیر(واحد)	DFIG	مقادیر(واحد)	SCIG
0.1153 Ω/km	مقاومت توالی مثبت	575×1.73 V	ولتاژ نامی	9 MW	توان نامی	9 MW	توان نامی
0.413 Ω/km	مقاومت توالی صفر	60 Hz	فرکانس نامی	575 V	ولتاژ نامی	575 V	ولتاژ نامی
0.00105 H/km	اندوکتانس توالی مثبت	100×10 <sup>6</sup> VA	توان نامی مبدل	60 Hz	فرکانس نامی	60 Hz	فرکانس نامی
0.00332 H/km	اندوکتانس توالی صفر	1200 V	ولتاژ نامی پیوند DC	0.00706 pu	مقاومت استاتور	0.004843 pu	مقاومت استاتور

مقاومت رتور	0.004377 pu	مقاومت رتور	0.005 pu	ظرفیت معادل کل پیوند DC	$100 \times 10^{-6}$ F	ظرفیت توالی مثبت	$11.33 \times 10^{-9}$ F/km
اندوکتانس ناشتی استاتور	0.1248 pu	اندوکتانس ناشتی استاتور	0.171 pu	مقاومت میدل	0.0053 pu	ظرفیت توالی صفر	$5.01 \times 10^{-9}$ F/km
اندوکتانس ناشتی رتور	0.1791 pu	اندوکتانس ناشتی رتور	0.156 pu	اندوکتانس میدل	0.16 pu	طول خط	30 km
اندوکتانس متقابل	6.77 pu	اندوکتانس متقابل	2.9 pu				

synchronous compensator," *Renewable Energy & Power Quality Journal*, pp. 59-64, 2018.

[15] V. K. Maurya, "Comparative study of different grid connected wind energy conversion system configurations," *Journal of Informatics Electrical and Electronics Engineering (JIEEE)*, vol. 2, no. 2, pp. 1-13, 2021.

[16] P. Y. Grachev, A. S. Tabachinskiy, and P. Kanagavel, "New stator construction and simulation of high-efficiency wind turbine generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, pp. 1389-1396, 2020.

[17] H. Li, B. Zhao, C. Yang, H. Chen, and Z. Chen, "Analysis and estimation of transient stability for a grid-connected wind turbine with induction generator," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1469-1476, 2011.

[18] A. M. Rashad, S. Kamel, and F. Jurado, "Stability improvement of power systems connected with developed wind farms using SSSC controller," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 2767-2779, 2018.

[19] N. S. Kumar and J. Gokulakrishnan, "Impact of FACTS controllers on the stability of power systems connected with doubly fed induction generators," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 1172-1184, 2011.

[20] M. A. Abido, "Analysis of power system stability enhancement via excitation and facts-based stabilizers," *Electric Power Components and Systems*, vol. 32, pp. 75 - 91, 2004.

[21] M. Noroozian and G. Adersson, "Damping of power system oscillations by use of controllable components," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 2046-2054, 1994.

[22] S. Mokred, Y. Wang, and T. Chen, "Modern voltage stability index for prediction of voltage collapse and estimation of maximum loadability for weak buses and critical lines identification," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 145, 108596, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108596>.

[23] E. Vittal, M. J. O'Malley, and A. Keane, "A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 433-442, 2010.

## 7- مراجع

- [1] A. Abdollahi Chirani and A. Karami, "Investigating the effect of SSSC on the stability of the power system connected to the SCIG wind turbine," presented at *The 5th National Conference on New Technologies in Electrical, Computer and Mechanical Engineering of Iran, Tehran*, 2022, [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/1538213>. (in persian)
- [2] Z. Zhou, M. S. Mastoi, D. Wang, and M. Haris, "Control strategy of DFIG and SVG cooperating to regulate grid voltage of wind power integration point," *Electric Power Systems Research*, vol. 214, Part A, 108862, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108862>.
- [3] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. Hejde Nielsen, J. Kaas Pedersen, and N. Kjølstad Poulsen, "Modelling and transient stability of large wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 123-144, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(02\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(02)00017-0).
- [4] T. Yi, H. Ye, Q. Li, C. Zhang, W. Ren, and Z. Tao, "Energy storage capacity optimization of wind-energy storage hybrid power plant based on dynamic control strategy," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, Part A, 105372, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105372>.
- [5] M. G. Jolfaei, A. M. Sharaf, S. M. Shariatmadar, and M. B. Poudeh, "A hybrid PSS-SSSC GA-stabilization scheme for damping power system small signal oscillations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 337-344, 2016.
- [6] P. He, Q. Fang, H. Jin, Y. Ji, Z. Gong, and J. Dong, "Coordinated design of PSS and STATCOM-POD based on the GA-PSO algorithm to improve the stability of wind-PV-thermal-bundled power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 141, 108208, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108208>.
- [7] Y. K. Gounder, D. Nanjundappan, and V. Boominathan, "Enhancement of transient stability of distribution system with SCIG and DFIG based wind farms using STATCOM," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, pp. 1171-1180, 2016.
- [8] D. P. Gautam, V. Vittal, and T. Harbour, "Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 1426-1434, 2010.
- [9] B. Gyawali, C. R. Kandel, D. B. Sedai, and M. Raut, "Impact of wind farm on power system dynamics and stability using psat simulation," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 4, 2020.
- [10] V. K. Tiwari and A. R. Gupta, "Application of SVC and STATCOM for wind integrated power system," In: Kumar, J., Jena, P. (eds) *Recent Advances in Power Electronics and Drives. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Singapore, 2021, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8586-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8586-9_17).
- [11] J. Qi, W. Zhao, and X. Bian, "Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 209878-209885, 2020.
- [12] O. Apata and D. T. O. Oyedokun, "Impact of STATCOM on voltage stability of fixed speed wind farms," *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 1-5, 2020.
- [13] J. Bhukya and V. Mahajan, "Optimization of damping controller for PSS and SSSC to improve stability of interconnected system with DFIG based wind farm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 108, pp. 314-335, 2019.
- [14] S. A. Mohamed, L. Np, T. Pujol, and L. Pacheco, "Improvement of the performance stability of power grid with wind farms using static



