

## **Enhancement Fault Ride-Through of DFIG with Applications of ISM Control for Balance and Unbalance Voltage Sag**

**Mahmood Reza Shakarami<sup>1</sup>, Mahmood Joorabian<sup>2</sup>, Ehsan Afzalan<sup>3</sup>**

1. Department of Electrical Engineering, Engineering Faculty, Lorestan University, Khorram Abad, Iran
2. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Department of Electrical Engineering, Engineering Faculty, Lorestan University, Khorram Abad, Iran

### **Abstract:**

With the high penetration of the grid-connected wind power sources, the FRT capability is significantly required for the DFIG wind turbine to mitigate the system instability. For the FRT problem, because the DFIG is very vulnerable to the grid faults, it may not be able to ride through. These faults may result in a large voltage dip at the connection point of the DFIG. Subsequently, the voltage dip will cause the over current in the stator and rotor windings which may be damaged. In this paper, applications of integral sliding mode control (ISM) will be investigated for the fault ride-through (FRT) enhancement of the doubly-fed induction generator wind power system. In ISM will be studied for rotor-side converter (RSC) and stator-side converter (SSC) and series grid side converter (SGSC) control. In ISM approach, supplementary control generated by the complete models is achieved for FRT enhancement. Since the proposed methods are based on the general non-linear system theory, the FRT capability can indeed improve even under severe fault conditions. Performance comparisons among several existing FRT enhanced control will also be examined to show the effectiveness of these PI control schemes.

**Keywords** Integral Sliding Mode Control (ISM), Wind Turbine, Voltage Sag.

## طراحی کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی برای عبور از خطا در سیستم‌های انرژی بادی مبتنی بر DFIG برای کمبود ولتاژهای متقارن و نامتقارن محمودرضا شاکرمی<sup>۱</sup>، محمود جورابیان<sup>۲</sup>، احسان افزalan<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، گروه برق، دانشکده مهندسی - دانشگاه لرستان - لرستان - ایران

shakarami.mr@lu.ac.ir

۲- استاد، گروه برق، دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران

mjoorabian@scu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، گروه برق، دانشکده مهندسی - دانشگاه لرستان - لرستان - ایران

ehsan.afzalan@gmail.com

**چکیده:** با نفوذ زیاد منابع توان بادی متصل به شبکه، قابلیت عبور از خطا در توربین‌های بادی با DFIG شدیداً نیاز است تا از افت ولتاژ شدید در نقطه اتصال DFIG و در نتیجه، صدمه به آن جلوگیری کنند. در این مقاله، روش کنترلی مود لغزشی انتگرالی (ISMC) برای کنترل مبدل‌های سمت روتور (RSC) و سمت شبکه (GSC) توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG برای عبور از شرایط خطا پیشنهاد شده است. همچنین کنترل کننده پیشنهادی علاوه بر مبدل‌های DFIG برای مبدل سری سمت شبکه (SGSC) به صورت جداگانه، طراحی و نتایج را با روش PI مقایسه کرده است. در روش پیشنهادی، مسئله چترینگ روش‌های مرسوم مود لغزشی برطرف شده است. نتایج شبیه‌سازی، توانایی روش پیشنهادی را در کنترل مؤثر توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG در شرایط مختلف کمبود ولتاژهای متقارن و نامتقارن اثبات کرده‌اند. رویکرد پیشنهادی، توانایی حفظ جریان‌ها و ولتاژهای DFIG را در بازه‌های درخور قبول دارد و در نتیجه از صدمه به مبدل‌ها در طی شرایط مختلف خطا جلوگیری می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل مود لغزشی انتگرالی، توربین بادی، کمبود ولتاژ

### ۱- مقدمه

(GSC) استفاده می‌شود. کمبود ولتاژ بر عملکرد DFIG متصل به شبکه تأثیر می‌گذارد و به آن صدمه وارد می‌کند. در حالت کمبود ولتاژ، جریان روتور به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد که منجر به وارد شدن مبدل سمت روتور (RSC) به فرا - مدولاسیون و از دست رفتن تنظیم جریان روتور می‌شود. این افزایش در مراحل ابتدا و انتهای زمان کمبود ولتاژ از سایر زمان‌ها بیشتر است. در زمان خطا، گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ لینک DC نیز نوسانات زیادی را تجربه می‌کنند که ممکن است به قطع DFIG از شبکه منجر شود؛ بنابراین، اندازه جریان‌های روتور و استاتور باید محدود شده و در بازه‌های پذیرفته شده خود باقی بماند تا از

استفاده ژنراتورهای القایی از دوسوتغذیه (DFIG) در سیستم‌های تولید و توزیع انرژی بادی بسیار رایج است. به منظور تغذیه روتور در DFIGها معمولاً از مبدل‌های منبع ولتاژ سری در هر دو سمت روتور (RSC) و سمت شبکه

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۰

نام نویسنده مسئول: محمودرضا شاکرمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، لرستان، خرم آباد، دانشگاه لرستان، گروه برق

اتصال مداوم آن به شبکه را تضمین می کند. در مرجع [۹] از مبدل سمت روتور (RSC) به منظور کنترل جریان توالی منفی تزریق شده از طریق استاتور استفاده شد؛ در حالی که مبدل SGSC برای کنترل ولتاژ توالی منفی استاتور و کمینه سازی نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش از کنترل کننده های PI برای کنترل مبدل های RSC، GSC و SGSC در شرایط کمبود ولتاژ استفاده شده است. تکنیک های کنترلی کلاسیک از قبیل کنترل کننده های مبتنی بر PI [۱۳-۱۰] فقط در شرایط ولتاژ شبکه ایدئال، عملکرد مناسبی دارند و در شرایط خطا، بیشتر منجر به نوسان های چشمگیر در توان های اکتیو و راکتیو، ولتاژ لینک DC و گشتاور الکترومغناطیسی می شوند [۱۴]؛ بنابراین، استفاده از روش های کنترلی که عملکرد بهتری در شرایط بروز خطا دارند، ضروری به نظر می رسد.

در این مقاله همانند مرجع [۹] برای حفظ ولتاژ استاتور در بازه های قابل قبول و ممانعت از قطع DFIG از شبکه در طی کمبود ولتاژهای عمیق، یک SGSC به ساختار DFIG اضافه شده است. هدف این مقاله، ارائه روش کنترل مد لغزشی انتگرالی (ISMC) به منظور کنترل جداگانه مبدل های RSC، GSC و SGSC برای بهبود عملکرد DFIG نصب شده در ریزش شبکه در شرایط خطا است. این نوع کنترل کننده غیرخطی باعث عملکرد نرم DFIG در طی شرایط کمبود ولتاژ شده است و در عین حال، الزامات اخیر کد شبکه (grid code) نشان داده شده در شکل (۱) را نیز برآورده می کند. این روش با افزودن یک جمله انتگرالی به متغیرهای مد لغزشی، به همگرایی در زمان محدود و حفظ ویژگی های مقاوم بودن کنترل مد لغزشی (SMC) دست یافته است و در عین حال، دو ضعف روش کنترل مد لغزشی را بر طرف می کند که عبارت اند از پدیده چترینگ (chattering) ناشی از فرکانس سویچینگ بالای کنترل و الزام قید برابر واحد بودن درجه نسبی [۲۰-۱۵]. به منظور بررسی عملکرد گذر از خطای کنترل کننده پیشنهادی، خطاهای متقارن و نامتقارن در سیستم مورد مطالعه، ارزیابی و نتایج روش پیشنهادی با کنترل کننده PI مقایسه شده اند.

قطع DFIG از شبکه جلوگیری شود. یادآوری می شود کنترل کننده مبدل های RSC و GSC به تنهایی قادر به جلوگیری از قطع توربین های بادی از شبکه نیستند؛ بنابراین، طرح گذر از خطا باید توسط کنترل کننده های اضافی تقویت شود تا اتصال مداوم به شبکه را مستقل از اندازه خطا تضمین کند.

در مرجع [۱] از افزودن مدارهایی به ساختار DFIG استفاده شده که باعث جذب مقادیر زیاد توان راکتیو در طی کمبود ولتاژها شده است و ممکن است منجر به تشدید بیشتر کمبود ولتاژ شود. یک اینورتر ۹ سویچه با دو ولتاژ خروجی مستقل در مرجع [۲]، جایگزینی برای مبدل های GSC و سری پیشنهاد شده است که منجر به افزایش تلفات ناشی از فرکانس کلیدزنی در مقایسه با اینورترهای مرسوم می شود. تزریق توان راکتیو با استفاده از المان های راکتیو موازی از قبیل STATCOM به عنوان جایگزین در مرجع [۳] پیشنهاد شده است. یک امپدانس غیرفعال سری سمت شبکه (SGSPI) به منظور کنترل DFIG در طی کمبود ولتاژها در نظر گرفته شد [۴]. به کارگیری SGSPI منجر به نوسان های بزرگ در گشتاور الکترومغناطیسی هم در نقطه آغاز و هم نقطه پایان کمبود ولتاژ می شود. مقاومت های دینامیکی سری رویکرد دیگری است که برای حفظ ولتاژهای استاتور و جریان های روتور در بازه های قابل قبول استفاده شده است [۵]. این روش زمانی مناسب نیست که DFIG به شبکه توان راکتیو تزریق کند. همچنین رویکردهای گذر از خطای ذکر شده معمولاً ولتاژ استاتور را در سطوح قبل از خطای خود نگه نمی دارند؛ بنابراین به گذارهای مکانیکی و الکتریکی نامطلوب در سیستم منجر می شوند. DVR، جبران ساز سری فعال در مراجع [۸-۶] پیشنهاد شده است. پیچیدگی اجرای کنترل کننده ها در DVR مانع گسترش وسیع آن در سیستم های انرژی بادی شده است. همچنین، افزایشی بیشتر از ۱۰٪ در اضافه جریان روتور و استاتور تحت کمبود ولتاژهای تکفاز و سه فاز هنگام استفاده از روش پیشنهادی در این مراجع گزارش شده است.

به تازگی، مبدل های سری سمت شبکه (SGSC) به عنوان مکانیزم گذر از شرایط خطا پیشنهاد شده اند [۹]؛ این مبدل، کمبود ولتاژها را با تزریق ولتاژ اضافی به DFIG، حذف و

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{array}{c} \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{array} \right] \\ &= \left[ \begin{array}{c} \frac{1}{\rho L_r} \left( -R_r i_{rd} + s \omega_s \rho L_r i_{rq} - \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) \\ \frac{1}{\rho L_r} \left( -R_r i_{rq} - s \omega_s \rho L_r i_{rd} - \frac{M}{L_s} s \right) \end{array} \right] \\ &+ \frac{1}{\rho L_r} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta F_{ed} + d_{ed} \\ \Delta F_{eq} + d_{eq} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۳)$$

که  $\rho = 1 - M^2 / L_s L_r$  و  $\Delta F_{ed}$  و  $d_{ed}$  پارامترهای نشان دهنده دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش خارجی مدل سمت روتور (RSC) هستند.

شار استاتور به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\phi_{sdq} = \int (V_{sdq} - R_s i_{sdq}) dt. \quad (۴)$$

### ۲-۲- طراحی کنترل ISMC برای RSC

سطوح لغزشی زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{cases} S_{de}(t) = i_{rd} - i_{rd-ref} \\ S_{qe}(t) = i_{rq} - i_{rq-ref} \end{cases} \quad (۵)$$

با مشتق‌گیری مرتبه اول از سطوح لغزشی فوق، نتیجه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{S}_{de}(t) = \dot{i}_{rd} - \dot{i}_{rd-ref} \\ \dot{S}_{qe}(t) = \dot{i}_{rq} - \dot{i}_{rq-ref} \end{cases} \quad (۶)$$

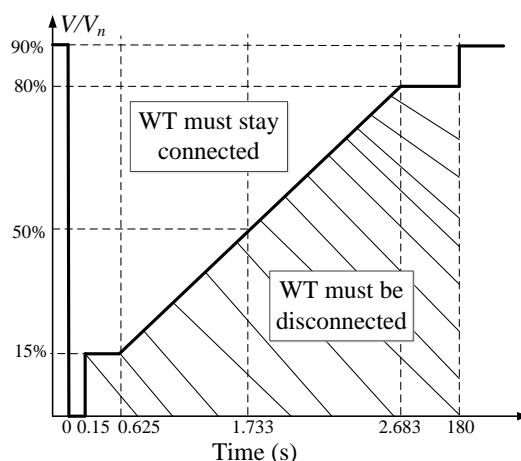
با جایگذاری (۳) در (۶) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{S}_{de} \\ \dot{S}_{qe} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{F_{ed} - \dot{i}_{rd-ref}}{\Lambda_{ed}} \\ \frac{F_{eq} - \dot{i}_{rq-ref}}{\Lambda_{eq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta F_{ed} + d_{ed} \\ \Delta F_{eq} + d_{eq} \end{bmatrix} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} G_{e1} & 0 \\ 0 & G_{e2} \end{bmatrix}}_{G_e} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن  $G_{e1} = G_{e2} = 1 / \rho L_r$

مشتق دوم رابطه (۵) به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \ddot{S}_{de} \\ \ddot{S}_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Lambda}_{ed} \\ \dot{\Lambda}_{eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \dot{F}_{ed} + \dot{d}_{ed} \\ \Delta \dot{F}_{eq} + \dot{d}_{eq} \end{bmatrix} + G_e \begin{bmatrix} \dot{V}_{rd} \\ \dot{V}_{rq} \end{bmatrix} \quad (۸)$$



شکل (۱): الزامات کد شبکه اخیر برای گذر از خطا

### ۲- کنترل مبدل سمت روتور (RSC)

در این مقاله، DFIG به صورت مدل غیرخطی مطابق مراجع [۲۱-۲۳] در نظر گرفته شده است.

### ۲-۱- مدل سازی

معادلات RSC در قاب مرجع d-q گردان با سرعت سنکرون به صورت ذیل هستند:

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} + R_s i_{sd} + \omega_s \phi_{sq} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = V_{sq} + R_s i_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rd} + R_r i_{rd} + \omega_r \phi_{rq} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = V_{rq} + R_r i_{rq} - \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (۱)$$

شارهای پیوندی با معادلات زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (۲)$$

معادلات دینامیکی مؤلفه‌های طولی و متعامد جریان‌های روتور با جایگذاری معادلات (۲) در (۱) به دست می‌آیند. با صرف نظر از مقاومت استاتور و در نظر گرفتن محور q، هم‌راستا با ولتاژ استاتور، می‌توان نوشت [۱۹]:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} u_{de1} \\ u_{qe1} \end{bmatrix} \\ & = G_e^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{ed} \\ \dot{\lambda}_{eq} \end{bmatrix} dw \\ & - G_e^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} \beta_{de} \dot{S}_{de} + \alpha_{de} \dot{e}_{dle} \\ \beta_{qe} \dot{S}_{qe} + \alpha_{qe} \dot{e}_{qle} \end{bmatrix} dw, \end{aligned} \quad (15)$$

و  $\dot{u}_{dqe2}$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \dot{u}_{de2} \\ \dot{u}_{qe2} \end{bmatrix} \\ & = -G_e^{-1} \begin{bmatrix} (K_{d1e} + K_{d2e} \|i_{rd}\|) \text{sign}(\sigma_{de}) + K_{d3e} \sigma_{de} \\ (K_{q1e} + K_{q2e} \|i_{rq}\|) \text{sign}(\sigma_{qe}) + K_{q3e} \sigma_{qe} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} u_{de2} \\ u_{qe2} \end{bmatrix} \\ & = -G_e^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} (K_{d1e} + K_{d2e} \|i_{rd}\|) \text{sign}(\sigma_{de}) + K_{d3e} \sigma_{de} \\ (K_{q1e} + K_{q2e} \|i_{rq}\|) \text{sign}(\sigma_{qe}) + K_{q3e} \sigma_{qe} \end{bmatrix} dw, \end{aligned} \quad (17)$$

اثبات:

تابع لیپانوف زیر در نظر گرفته می شود.

$$V_e = \frac{1}{2} \sigma_{dqe}^T \sigma_{dqe} > 0 \quad (18)$$

برای تضمین همگرایی، مشتق (۱۸) باید منفی باشد:

$$\dot{V}_e = \sigma_{dqe}^T \dot{\sigma}_{dqe} < 0 \quad (19)$$

جایگذاری معادلات (۱۱) در (۱۹) و استفاده از قوانین

کنترلی معادلات (۱۵) و (۱۷) نتیجه می دهد:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e & = \sigma_{dqe}^T \left\{ \begin{bmatrix} \Delta \dot{F}_{ed} + \dot{d}_{ed} \\ \Delta \dot{F}_{eq} + \dot{d}_{eq} \end{bmatrix} \right. \\ & \left. - \begin{bmatrix} (K_{d1e} + K_{d2e} \|i_{rd}\|) \text{sign}(\sigma_{de}) + K_{d3e} \sigma_{de} \\ (K_{q1e} + K_{q2e} \|i_{rq}\|) \text{sign}(\sigma_{qe}) + K_{q3e} \sigma_{qe} \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e & \leq |\sigma_{dqe}^T| \left\{ \begin{bmatrix} \|\Delta \dot{F}_{ed} + \dot{d}_{ed}\| \\ \|\Delta \dot{F}_{eq} + \dot{d}_{eq}\| \end{bmatrix} \right. \\ & \left. - \begin{bmatrix} (K_{d1e} + K_{d2e} \|i_{rd}\|) \text{sign}(\sigma_{de}) + K_{d3e} \sigma_{de} \\ (K_{q1e} + K_{q2e} \|i_{rq}\|) \text{sign}(\sigma_{qe}) + K_{q3e} \sigma_{qe} \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

با اعمال فرضیه (۱)، نتیجه می دهد:

یک منی فولد مود لغزشی انتگرالی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{de}(t) = \dot{S}_{de} + \beta_{de} S_{de} + \alpha_{de} e_{dle} \\ \dot{\sigma}_{qe}(t) = \dot{S}_{qe} + \beta_{qe} S_{qe} + \alpha_{qe} e_{qle} \end{cases} \quad (9)$$

که در آن  $e_{dqle}(t) = \int \text{sign}(S_{dqle}(t)) dt$  انتگرال علامت خطای ردیابی مؤلفه های d-q است.

قوانین کنترلی را می توان با استفاده از روند ذیل به دست آورد.

روابط ذیل تعریف می شوند:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{de}(t) = \dot{S}_{de} + \beta_{de} \dot{S}_{de} + \alpha_{de} \dot{e}_{dle} \\ \dot{\sigma}_{qe}(t) = \dot{S}_{qe} + \beta_{qe} \dot{S}_{qe} + \alpha_{qe} \dot{e}_{qle} \end{cases} \quad (10)$$

با جایگذاری (۸) در (۹) رابطه ذیل به دست می آید:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{de} \\ \dot{\sigma}_{qe} \end{bmatrix} & = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{ed} \\ \dot{\lambda}_{eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \dot{F}_{ed} + \dot{d}_{ed} \\ \Delta \dot{F}_{eq} + \dot{d}_{eq} \end{bmatrix} \\ & + G_e \begin{bmatrix} \dot{V}_{rd} \\ \dot{V}_{rq} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \beta_{de} \dot{S}_{de} + \alpha_{de} \dot{e}_{dle} \\ \beta_{qe} \dot{S}_{qe} + \alpha_{qe} \dot{e}_{qle} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

فرضیه (۱):

به منظور تضمین اینکه  $\Delta \dot{F}_{edq}$  و  $\dot{d}_{edq}$  مقید باشند، فرض می شود دو قید زیر برقرار هستند [۲۰]:

$$\begin{bmatrix} \|\Delta \dot{F}_{ed} + \dot{d}_{ed}\| \\ \|\Delta \dot{F}_{eq} + \dot{d}_{eq}\| \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} K_{d1e} + K_{d2e} \|i_{rd}\| \\ K_{q1e} + K_{q2e} \|i_{rq}\| \end{bmatrix} \quad (12)$$

قضیه (۱):

برای سیستم غیرخطی غیرمعین (۳)، قانون کنترلی زیر تعریف می شود:

$$V_{rdq} = u_{dqe} = u_{dqe1} + u_{dqe2}, \quad (13)$$

$u_{dqe1}$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{u}_{de1} \\ \dot{u}_{qe1} \end{bmatrix} & = -G_e^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{ed} \\ \dot{\lambda}_{eq} \end{bmatrix} \\ & - G_e^{-1} \begin{bmatrix} \beta_{de} \dot{S}_{de} + \alpha_{de} \dot{e}_{dle} \\ \beta_{qe} \dot{S}_{qe} + \alpha_{qe} \dot{e}_{qle} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

بنابراین:

$$\begin{cases} S_{dg}(t) = i_{gd} - i_{gd-ref} \\ S_{qg}(t) = i_{gq} - i_{gq-ref} \end{cases} \quad (26)$$

که مقدار مرجع مؤلفه d جریان مبدل سمت شبکه  $i_g$  است.

مشق اول سطوح لغزشی نتیجه می دهد:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_{dg} \\ \dot{S}_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_{gd} - i_{gd-ref}}{\Lambda_{gd}} \\ \frac{F_{gq} - i_{gq-ref}}{\Lambda_{gq}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta F_{gd} + d_{gd} \\ \Delta F_{gq} + d_{gq} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} G_{g1} & 0 \\ 0 & G_{g2} \end{bmatrix}}_{G_g} \begin{bmatrix} V_{gd} \\ V_{gq} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

که  $G_{e1} = G_{e2} = 1/L_g$  مشتق دوم (۲۷) نتیجه می دهد:

$$\begin{bmatrix} \ddot{S}_{dg} \\ \ddot{S}_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Lambda}_{gd} \\ \dot{\Lambda}_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \dot{F}_{gd} + \dot{d}_{gd} \\ \Delta \dot{F}_{gq} + \dot{d}_{gq} \end{bmatrix} + G_g \begin{bmatrix} \dot{V}_{gd} \\ \dot{V}_{gq} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

منیقولدهای لغزشی انتگرالی زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\begin{cases} \sigma_{dg}(t) = \dot{S}_{dg} + \beta_{dg} S_{dg} + \alpha_{dg} e_{d1g} \\ \sigma_{qg}(t) = \dot{S}_{qg} + \beta_{qg} S_{qg} + \alpha_{qg} e_{q1g} \end{cases}, \quad (29)$$

قوانین کنترلی را مانند روش طراحی کنترل RSC به دست می آوریم که در بخش قبلی توضیح داده شده است؛ بنابراین:

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{dg} \\ \dot{\sigma}_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Lambda}_{gd} \\ \dot{\Lambda}_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \dot{F}_{gd} + \dot{d}_{gd} \\ \Delta \dot{F}_{gq} + \dot{d}_{gq} \end{bmatrix} + G_g \begin{bmatrix} \dot{V}_{gd} \\ \dot{V}_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{dg} \dot{S}_{dg} + \alpha_{dg} \dot{e}_{d1g} \\ \beta_{qg} \dot{S}_{qg} + \alpha_{qg} \dot{e}_{q1g} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

فرضیه (۲):

شرط زیر باید برای مقیدماندن  $\Delta F_{gdq}$  و  $\dot{d}_{gdq}$  برآورده شود [۱۷].

$$\begin{bmatrix} \|\Delta \dot{F}_{gd} + \dot{d}_{gd}\| \\ \|\Delta \dot{F}_{gq} + \dot{d}_{gq}\| \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} K_{d1g} + K_{d2g} \|i_{gd}\| \\ K_{q1g} + K_{q2g} \|i_{gq}\| \end{bmatrix}. \quad (31)$$

قانون کنترلی بر مبنای قضیه (۱) به صورت زیر طراحی می شود:

$$V_{gdq} = u_{dqg} = u_{dqg1} + u_{dqg2}, \quad (32)$$

به صورت زیر تعریف می شود:

$$\dot{V}_e \leq -\{K_{d3e} |\sigma_{de}|^2 + K_{q3e} |\sigma_{qe}|^2\} \quad (22)$$

بنابراین، همگرایی  $S(t)$  و  $e_I(t)$  به صفر در زمان محدود تضمین می شود.

در صورتی که قید زیر ارضا شود، منیقولد لغزشی در زمان محدود به صفر همگرا خواهد شد:

$$\sigma(0) = \dot{S}(t) + \beta S(t) + \alpha e_I(t) = 0 \quad (23)$$

با حل معادله (۲۳) کل زمان همگرایی می تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$T_f = T_{conv} = \frac{2 \|S_{conv}\| + \|Ln(S_{conv})\| - 4 \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}\right) S(0) - 2Ln(S(0))}{2\beta} \quad (24)$$

که  $T_{conv}$  زمانی است که  $\sigma$  از نقطه  $\sigma(0) \neq 0$  به صفر می رسد.

### ۳- طراحی کنترل برای مبدل سمت شبکه (GSC)

#### ۳-۱- مدل سازی

معادلات الکتریکی بیان کننده عملکرد GSC در قاب مرجع (d-q) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{gd}}{dt} \\ \frac{di_{gq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_g} (V_{sd} - R_g i_{gd} + \omega_s L_g i_{gq}) \\ \frac{1}{L_g} (V_{sq} - R_g i_{gq} - \omega_s L_g i_{gd}) \end{bmatrix} + \frac{1}{L_g} \begin{bmatrix} V_{gd} \\ V_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta F_{gd} + d_{gd} \\ \Delta F_{gq} + d_{gq} \end{bmatrix} \quad (25)$$

که  $d_{gdq}$  و  $\Delta F_{gdq}$  جملات غیرمعین نشان دهنده دینامیک های مدل نشده و اغتشاشات خارجی GSC هستند.

#### ۳-۲- طراحی کنترل ISMC برای GSC

روش ISMC به منظور کنترل مبدل سمت شبکه (GSC) DFIG با استفاده از متغیرهای سویچینگ زیر پیشنهاد می شود:

یک شناسایی کننده کمبود ولتاژ به منظور تشخیص کمبود ولتاژها موقع رخ دادن طراحی می شود. شناسایی از طریق مقایسه ولتاژ سرعتی ناشی از شار سنکرون استاتور  $(j\omega_s \varphi_s)$  ( با ولتاژ استاتور  $V_s$  انجام می شود. شناسایی وقتی انجام می شود که ولتاژ استاتور  $V_s$  از یک مقدار مرزی از پیش تنظیم شده  $\xi$  مطابق [۲۵] بیشتر شود:

$$|V_s - j\omega_s \psi_s| \geq \xi \quad (۳۷)$$

### ۴-۲- طراحی ISMC برای SGSC

هدف اصلی کنترل مبدل سری، تزریق ولتاژ به شبکه به منظور متعادل کردن ولتاژهای استاتور و در نتیجه، جریان های استاتور و روتور است. مطابق روابط ذیل از روش ISMC به منظور طراحی کنترلر برای SGSC استفاده می شود. در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} S_\alpha(t) = v_{ainj} - v_{ainj-dif} \\ S_\beta(t) = v_{\beta inj} - v_{\beta inj-dif} \end{cases} \quad (۳۸)$$

جایی که:

$$\begin{cases} v_{ainj-dif} = v_{adesired} - v_{aactual} \\ v_{\beta inj-dif} = v_{\beta desired} - v_{\beta actual} \end{cases} \quad (۳۹)$$

با مشتق گیری مرتبه اول سطوح لغزشی رابطه (۳۹)، رابطه زیر به دست می آید.

$$\begin{cases} \dot{S}_\alpha(t) = \dot{v}_{ainj} - \dot{v}_{ainj-ref} \\ \dot{S}_\beta(t) = \dot{v}_{\beta inj} - \dot{v}_{\beta inj-ref} \end{cases} \quad (۴۰)$$

منیفولد زیر در نظر گرفته می شود:

$$\begin{cases} \sigma_\alpha(t) = \dot{S}_\alpha + \beta_\alpha S_\alpha + \alpha_\alpha e_{\alpha l} \\ \sigma_\beta(t) = \dot{S}_\beta + \beta_\beta S_\beta + \alpha_\beta e_{\beta l} \end{cases} \quad (۴۱)$$

کنترل کننده SGSC مطابق رابطه ذیل طراحی می شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}_\alpha \\ \dot{\sigma}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{S}_\alpha - \beta_\alpha \dot{v}_{ainj-dif} \\ \dot{S}_\beta - \beta_\beta \dot{v}_{\beta inj-dif} \end{bmatrix} \frac{1}{\chi} + \begin{bmatrix} \beta_\alpha & 0 \\ 0 & \beta_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{ainj} \\ \dot{v}_{\beta inj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_\alpha \dot{e}_{\alpha l} \\ \alpha_\beta \dot{e}_{\beta l} \end{bmatrix} \quad (۴۲)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{dg1} \\ \dot{u}_{qg1} \end{bmatrix} = -G_g^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\Lambda}_{gd} \\ \dot{\Lambda}_{gq} \end{bmatrix} - G_g^{-1} \begin{bmatrix} \beta_{dg} \dot{S}_{dg} + \alpha_{dg} \dot{e}_{d1g} \\ \beta_{qg} \dot{S}_{qg} + \alpha_{qg} \dot{e}_{q1g} \end{bmatrix} \quad (۳۳)$$

بنابراین:

$$\begin{bmatrix} u_{dg1} \\ u_{qg1} \end{bmatrix} = -G_g^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} \dot{\Lambda}_{gd} \\ \dot{\Lambda}_{gq} \end{bmatrix} dw - G_g^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} \beta_{dg} \dot{S}_{dg} + \alpha_{dg} \dot{e}_{d1g} \\ \beta_{qg} \dot{S}_{qg} + \alpha_{qg} \dot{e}_{q1g} \end{bmatrix} dw. \quad (۳۴)$$

$\dot{u}_{dqg2}$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{dg2} \\ \dot{u}_{qg2} \end{bmatrix} = -G_g^{-1} \begin{bmatrix} (K_{d1g} + K_{d2g} \|i_{gd}\|) \text{sign}(\sigma_{dg}) + K_{d3g} \sigma_{dg} \\ (K_{q1g} + K_{q2g} \|i_{gq}\|) \text{sign}(\sigma_{qg}) + K_{q3g} \sigma_{qg} \end{bmatrix} \quad (۳۵)$$

بنابراین:

$$\begin{bmatrix} u_{dg2} \\ u_{qg2} \end{bmatrix} = -G_g^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} (K_{d1g} + K_{d2g} \|i_{gd}\|) \text{sign}(\sigma_{dg}) + K_{d3g} \sigma_{dg} \\ (K_{q1g} + K_{q2g} \|i_{gq}\|) \text{sign}(\sigma_{qg}) + K_{q3g} \sigma_{qg} \end{bmatrix} dw, \quad (۳۶)$$

یادآوری می شود تحلیل پایداری لیاپانوف مشابه با تحلیل انجام شده در بخش قبلی است.

### ۴-۱- مبدل سری سمت شبکه (SGSC)

#### ۴-۱- ساختار SGSC

برای حذف مؤثر کمبود ولتاژها، یک اینورتر سری در لینک DCی DFIG قرار داده شده است و با استفاده از سه ترانسفورماتو تکفاز به شبکه متصل می شود که باعث تزریق ولتاژ به باس DFIG در طی خطاها و همچنین محافظت از مدارهای روتور و قدرت در برابر اضافه جریان ها می شود [۲۴]؛ بنابراین، وقتی در ریزش شبکه خطاها رخ می دهند، مبدل سوم، ولتاژ باس DFIG را بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت حفظ می کند؛ بنابراین، جریان های استاتور و روتور DFIG را در مقادیر نامی خود نگه می دارد و اتصال مداوم توربین ها را به شبکه تضمین می کند.

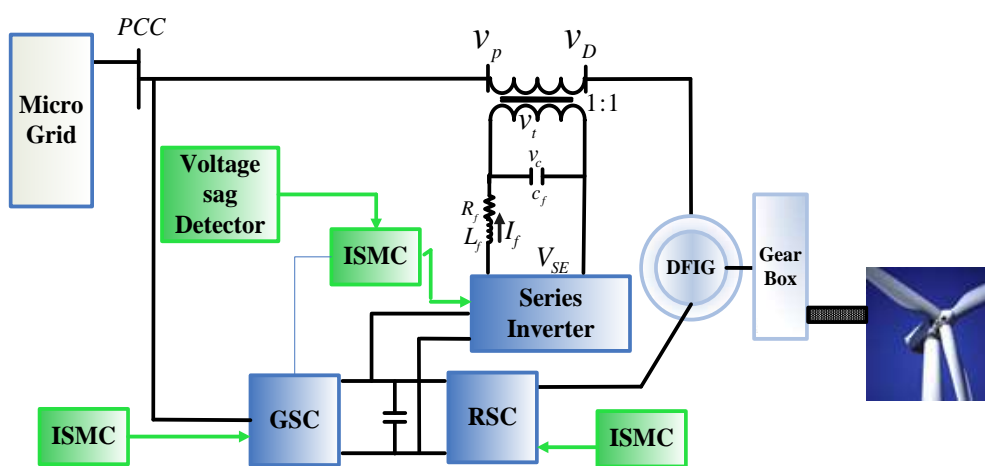
$$\begin{bmatrix} u_{\alpha 1} \\ u_{\beta 1} \end{bmatrix} = -\ell^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} \chi_{\alpha} \\ \chi_{\beta} \end{bmatrix} dw - \ell^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} \alpha_{dg} \dot{e}_{\alpha 1} \\ \alpha_{qg} \dot{e}_{\beta 1} \end{bmatrix} dw, \quad (44)$$

قانون کنترلی براساس قضیه ۱ به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$v_{\alpha \beta inj} = u_{\alpha \beta} = u_{\alpha \beta 1} + u_{\alpha \beta 2} \quad (43)$$

که در آن  $u_{\alpha \beta 1}$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha 2} \\ u_{\beta 2} \end{bmatrix} = -\ell^{-1} \int_0^t \begin{bmatrix} (K_{\alpha 1} + K_{\alpha 2} \|v_{\alpha inj}\|) \text{sign}(\sigma_{\alpha}) + K_{\alpha 3} \sigma_{\alpha} \\ (K_{\beta 1} + K_{\beta 2} \|v_{\beta inj}\|) \text{sign}(\sigma_{\beta}) + K_{\beta 3} \sigma_{\beta} \end{bmatrix} dw, \quad (45)$$



شکل (۲): دیاگرام شماتیکی کل سیستم

DFIG از شبکه، ولتاژ استاتور را در کمتر از ۱۵۰ میلی ثانیه بازیابی کند؛ بنابراین، مدت زمان ۲۰۰ میلی ثانیه بهترین گزینه برای بررسی قابلیت های گذر از خطای ولتاژ پایین است.

### ۵-۱- عملکرد DFIG به ازای شرایط سنکرون

ولتاژ PCC و ولتاژ تزریق شده با SGSC و ولتاژ استاتور DFIG در شکل (۳) نشان داده شده اند. این شکل نشان می دهد ولتاژهای باس DFIG حتی در طی کمبود ولتاژ نیز در سطوح نامی خود باقی می ماند؛ همچنین به دلیل جبران لحظه ای ولتاژ توسط SGSC، هیچ تغییری روی ولتاژهای DFIG ایجاد نشده است. جریان های استاتور و روتور در شکل (۴) نشان داده شده اند. شکل موج های گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ لینک DC به ترتیب در شکل های ۵ (الف-ج) نشان داده شده اند. مشاهده می شود پس از رخ دادن کمبود ولتاژ، جریان های روتور و استاتور در بازه زمانی درخور قبولی حفظ شده اند؛ همچنین، پدیده چترینگ در جریان ها، ولتاژ لینک DC و گشتاور الکترومغناطیسی

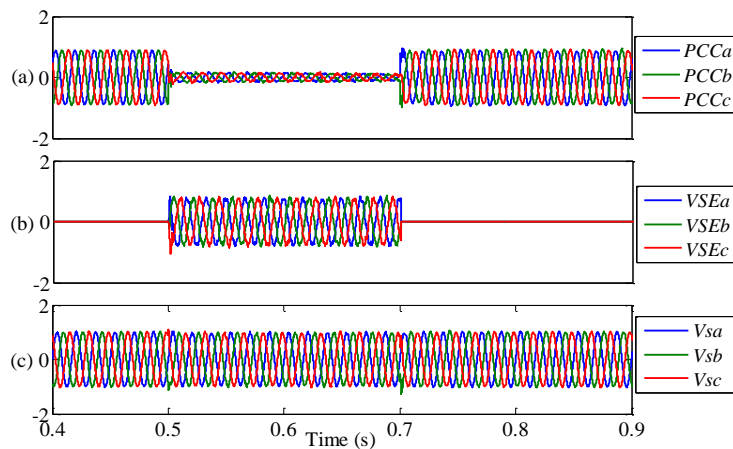
### ۵- نتایج شبیه سازی

روش پیشنهادی در نرم افزار MATLAB برای سیستم نشان داده شده در شکل (۲) به کار گرفته شده است. DFIG در نظر گرفته شده در یک ساختار ریز شبکه نصب شده است که جزئیات آن در مراجع [۲۶-۲۸] ارائه شده اند. ISMC به منظور کنترل جداگانه مبدل های RSC و GSC و همچنین کنترل SGSC طراحی شده است. شناسایی کمبود ولتاژ با استفاده از شناسایی کننده کمبود ولتاژ پیشنهادی انجام شده است. پارامترهای توربین بادی (RSC, GSC و لینک DC) و SGSC (ترانسفورمر و فیلتر) در نظر گرفته شده در ضمیمه ارائه شده اند.

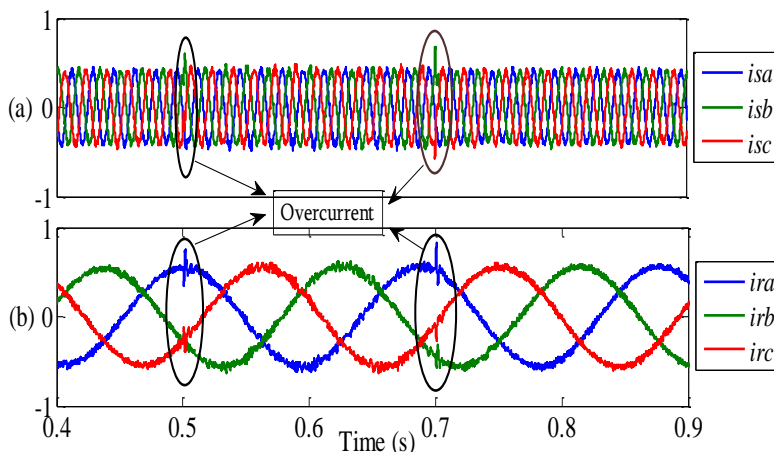
به منظور ارزیابی دقیق عملکرد روش پیشنهادی، خطاهای متقارن (سه خط به زمین) و نامتقارن (دو خط به زمین و تک فاز به زمین) در نظر گرفته شده و همچنین نتایج روش پیشنهادی با کنترل کننده PI مقایسه شده است. برای هر دو خطاهای متقارن و نامتقارن، یک کمبود ولتاژ ۹۰٪ به طول مدت ۲۰۰ میلی ثانیه در زمان  $t = 0.5s$  در نظر گرفته شده است. کنترل کننده باید به منظور اجتناب از قطع



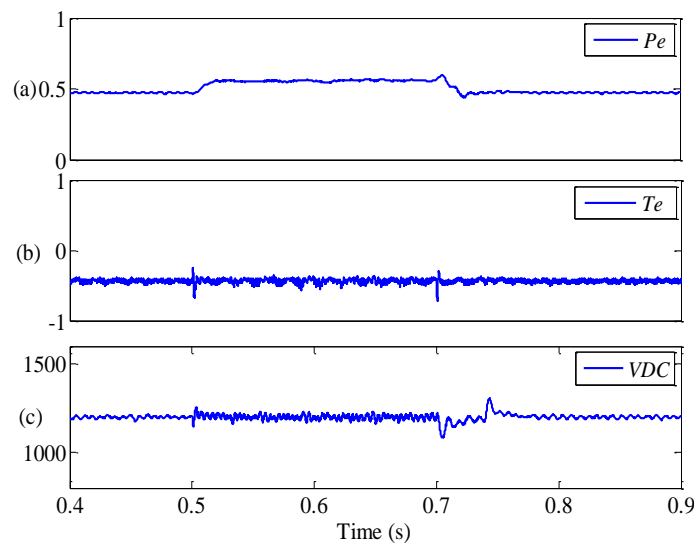
مشاهده نمی شود؛ این ویژگی مهمی است که به افزایش طول عمر تجهیزات الکترونیک قدرت منجر می شود.



شکل (۳): الف) ولتاژ نقطه PCC (pu)، ب) ولتاژ تزریق شده (pu)، ج) ولتاژ استاتور DFIG (pu) برای حالت اول



شکل (۴): الف) جریان استاتور، ب) جریان روتور DFIG (pu) برای حالت اول

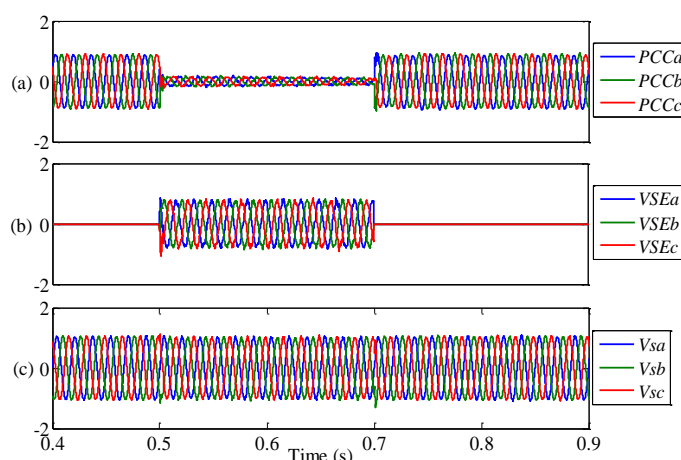


شکل (۵): الف) توان DFIG (pu)، ب) گشتاور الکترومغناطیسی (pu)، ج) ولتاژ لینک DC (V) برای حالت نخست

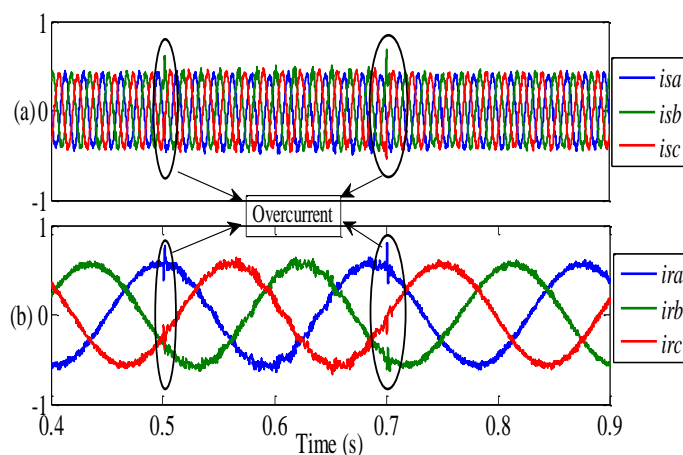
## ۲-۵- عملکرد DFIG در مود سنکرون و در طی کمبود ولتاژ سه فاز عمیق همراه با پارامترهای متغیر

به منظور بررسی مقاومت بودن روش پیشنهادی، افزایش ۲۰٪ در مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های استاتور و روتور و همچنین شرایط ولتاژ شبکه مشابه بخش (۱-۵) در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۶-۸)

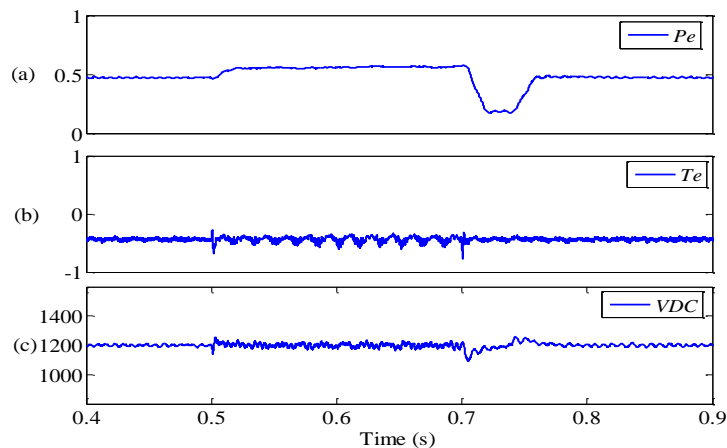
نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود با وجود تغییرات پارامترها، گشتاور، ولتاژ لینک DC و جریان‌های DFIG رفتاری مشابه شرایط نرمال (بخش (۱-۵)) از خود نشان می‌دهند. این موضوع، مقاوم بودن کنترل‌کننده در برابر تغییرات پارامترها و نیز کارایی آن در کنترل DFIG در طی کمبود ولتاژهای عمیق تغییر یافته پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل (۶): الف) ولتاژ نقطه PCC (pu)، ب) ولتاژ تزریق شده (pu)، ج) ولتاژ استاتور DFIG (pu) برای حالت دوم



شکل (۷): الف) جریان استاتور، ب) جریان روتور DFIG (pu) برای حالت دوم



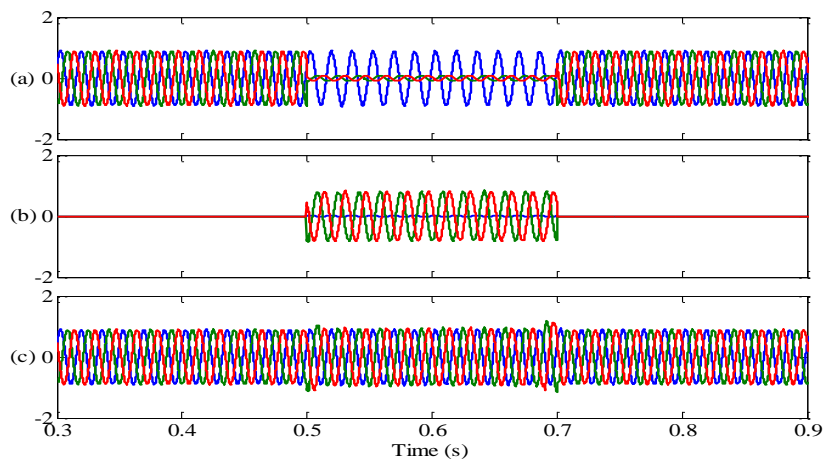
شکل (۸): الف) توان DFIG (pu)، ب) گشتاور الکترومغناطیسی (pu)، ج) ولتاژ لینک DC (V) برای حالت دوم

DFIG در شکل (۹) و جریان های استاتور و روتور DFIG در شکل (۱۰) نشان داده شده اند. شکل های ۱۱ (الف و ب) به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ لینک DC را نشان می دهند. به وضوح مشاهده می شود روش پیشنهادی حتی در شرایط نامتقارن دو فاز نیز به حفظ ولتاژهای باس DFIG در بازه های پذیرفتنی قادر است.

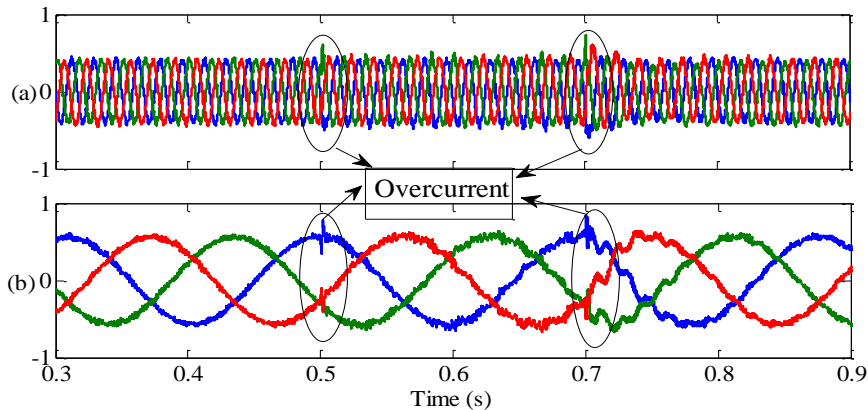
### ۳-۵- عملکرد DFIG در مود سنکرون و در طی

#### کمبود ولتاژهای دو فاز عمیق

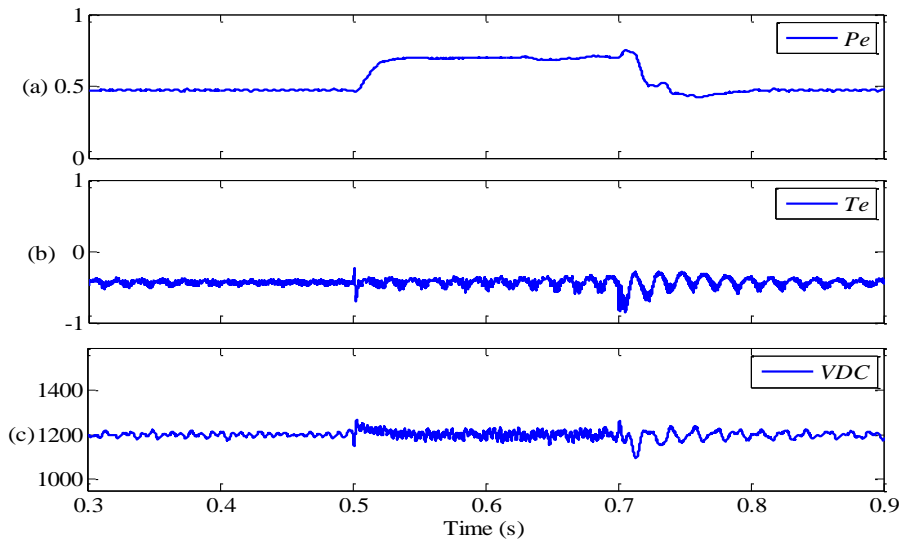
در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط خطای دو فاز نامتقارن ارزیابی می شود. DFIG همانند حالت های قبلی در معرض کمبود ولتاژ ۹۰٪ قرار می گیرد. ولتاژ PCC، ولتاژ تزریق شده توسط SGSC و ولتاژ استاتور



شکل (۹): الف) ولتاژ نقطه PCC (pu)، ب) ولتاژ تزریق شده (pu)، ج) ولتاژ استاتور DFIG (pu) برای حالت سوم



شکل (۱۰): الف) جریان استاتور، ب) جریان روتور DFIG (pu) برای حالت سوم



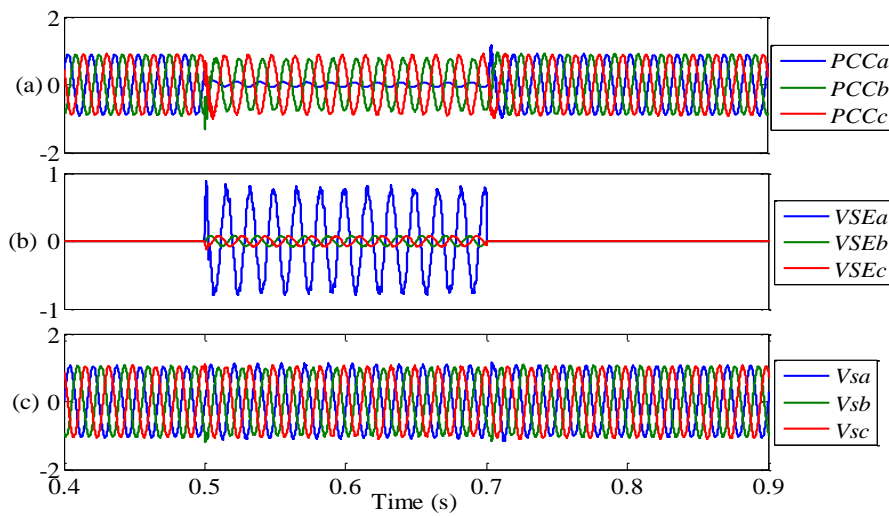
شکل (۱۱): الف) توان DFIG (pu)، ب) گشتاور الکترومغناطیسی (pu)، ج) ولتاژ لینک DC (V) برای حالت سوم

و ولتاژ لینک DC به ترتیب در شکل‌های ۱۴ (الف و ب) ارائه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی، توانایی روش پیشنهادی در حفظ ولتاژهای باس DFIG در سطوح نامی در شرایط در نظر گرفته شده را نشان داده است؛ همچنین، نشان می‌دهد روش مذکور در کنترل DFIG و ممانعت آن از جداسدن از ریزش‌بکه، حتی در طی کمبود ولتاژهای عمیق و خطاهای نامتقارن، بسیار کارا است.

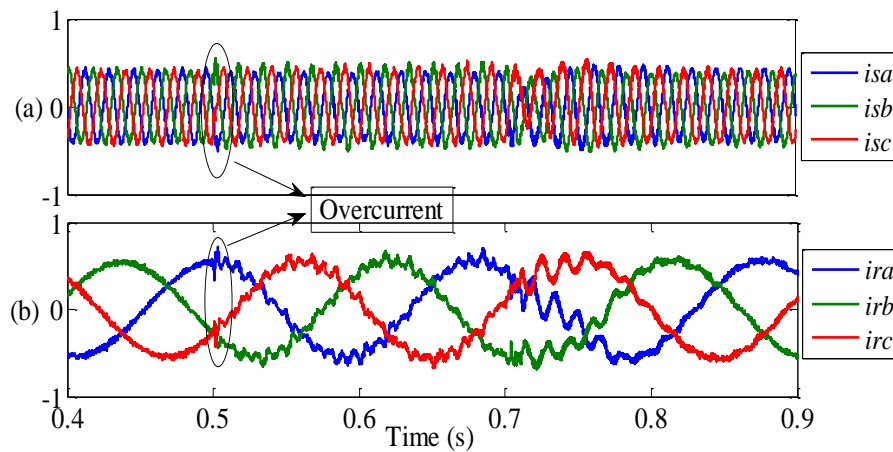
## ۵-۴- عملکرد DFIG در مود سنکرون و در طی

### کمبود ولتاژهای تکفاز عمیق

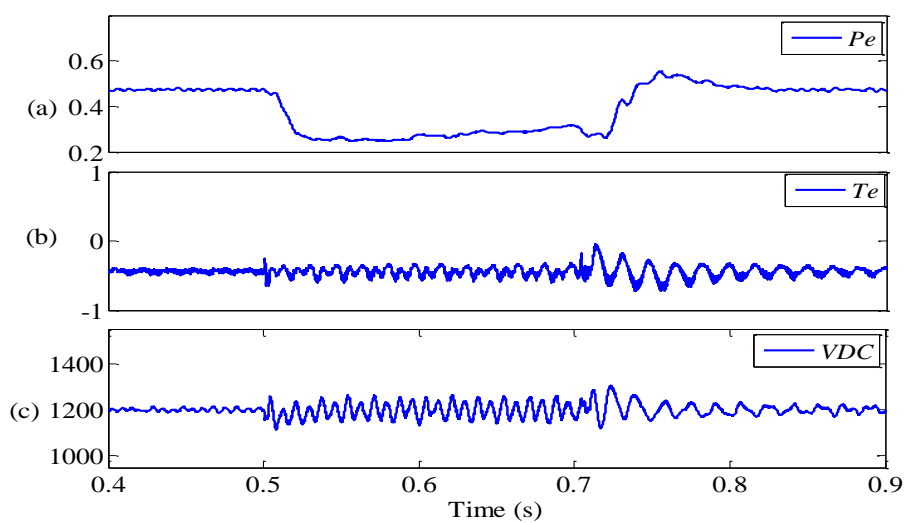
در این بخش عملکرد روش پیشنهادی در طی کمبود ولتاژ ۹۰٪ بررسی می‌شود. شکل (۱۲) ولتاژ PCC، ولتاژ تزریق‌شده توسط SGSC و ولتاژ استاتور DFIG را نشان می‌دهد. جریان‌های روتور و استاتور DFIG در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند. شکل موج‌های گشتاور الکترومغناطیسی



شکل (۱۲): الف) ولتاژ نقطه PCC (pu)، ب) ولتاژ تزریق شده (pu)، ج) ولتاژ استاتور DFIG (pu) برای حالت چهارم



شکل (۱۳): الف) جریان استاتور، ب) جریان روتور DFIG (pu) برای حالت چهارم

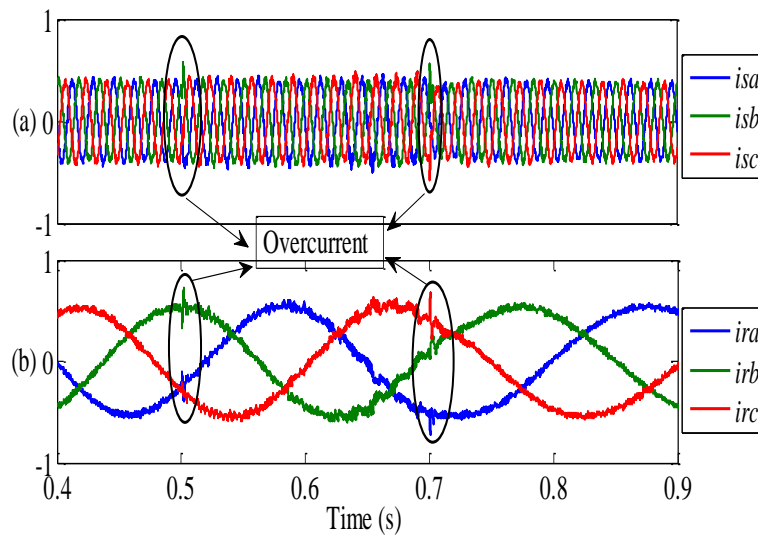


شکل (۱۴): الف) توان DFIG (pu)، ب) گشتاور الکترومغناطیسی (pu)، ج) ولتاژ لینک DC (V) برای حالت چهارم

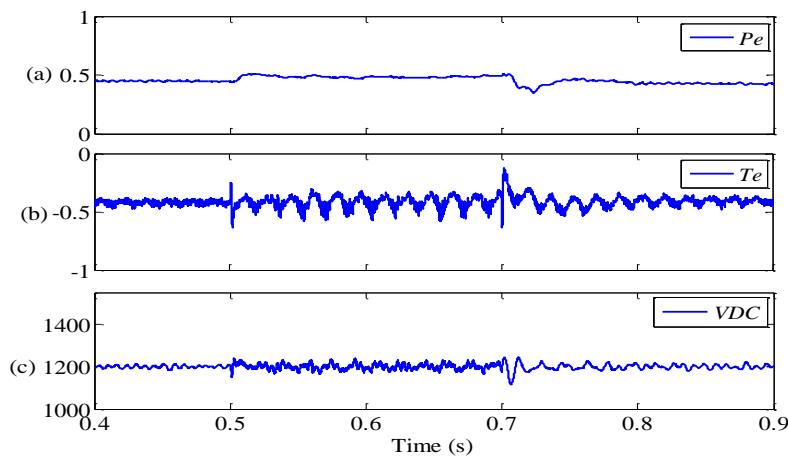
### ۵-۵- عملکرد DFIG در شرایط زیر سنکرون

در شرایط زیر سنکرون، توان روتور منفی بوده است؛ درحالی که توان استاتور مثبت است؛ بنابراین، بدون کنترل مناسب، شرایط زیر سنکرون ناپایدار است. عملکرد DFIG در این حالت و سرعت باد ۶ متر بر ثانیه در طی کمبود ولتاژ ۹۰٪ به مدت ۲۰۰ میلی ثانیه تحلیل شده است که در  $t = 0.5s$  شروع می شود. روش پیشنهادی برای کنترل ساختار DFIG در نظر گرفته می شود. همان طور که در شکل

۱۵ (الف-ب) نشان داده شده است، کنترلر قادر به حفظ جریان های استاتور و روتور در بازه های خود در طی افت ولتاژ است. شکل موج های توان DFIG، گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ لینک DC به ترتیب در شکل های ۱۶ (الف-ج) نشان داده شده اند. به وضوح مشاهده می شود DFIG در طی کمبود ولتاژهای عمیق و موده های زیر سنکرون پایدار است.



شکل (۱۵): (الف) جریان استاتور، (ب) جریان روتور DFIG (pu) برای حالت پنجم

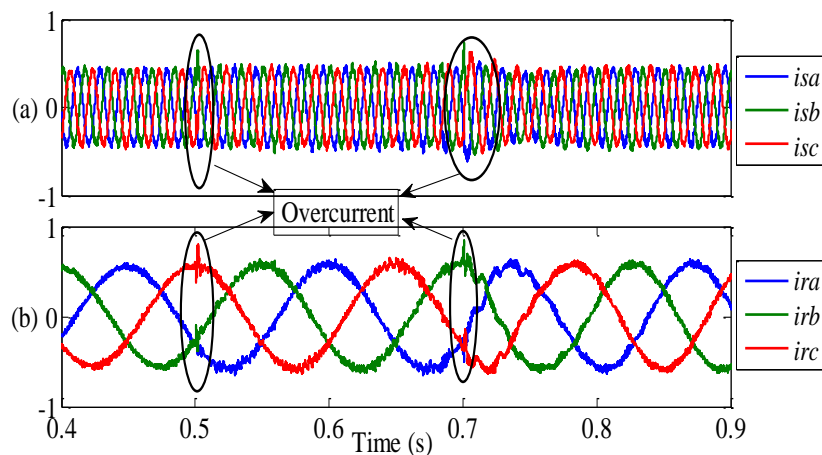


شکل (۱۶): (الف) توان DFIG (pu)، (ب) گشتاور الکترومغناطیسی (pu)، (ج) ولتاژ لینک DC (V) برای حالت پنجم

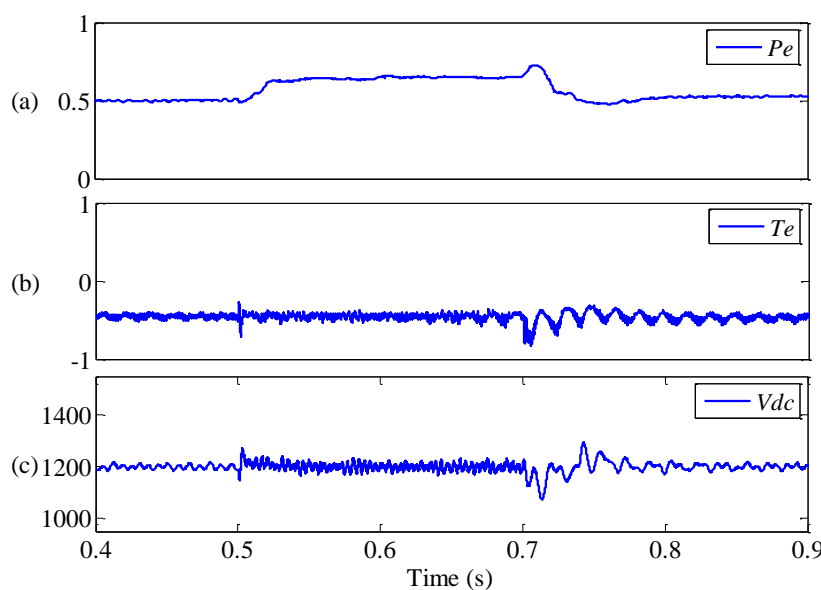
۵-۶- عملکرد DFIG در شرایط فوق سنکرون

در مود فوق سنکرون، مبدل سمت روتور به عنوان یکسوکننده عمل می کند؛ درحالی که مبدل سمت شبکه توان روتور را به شبکه با فرکانس شبکه تبدیل می کند. این ساختار توان حقیقی را هم از سمت استاتور و هم از سمت روتور به شبکه تزریق میکند و بار توان راکتیو را روی شبکه متصل شده کاهش میدهد. شرایط فوق سنکرون، مقادیر ویژه ناپایدار دارد که به ناپایداری DFIG منجر می شود. در این حالت، عملکرد DFIG با کمبود ولتاژ ۹۰٪ برای مدت ۲۰۰ میلی ثانیه و زمان شروع  $t = 0.5s$  مطالعه می شود. سرعت

باد در نظر گرفته شده در این تست ۱۴ متر بر ثانیه بوده است و رویکرد کنترلی پیشنهادی به ساختار DFIG اعمال می شود. شکل های ۱۷ (الف و ب) به ترتیب جریان های استاتور و روتور را نشان می دهند. به وضوح مشاهده می شود رویکرد پیشنهادی قادر به حفظ مقادیر جریان های استاتور و روتور در بازه قابل قبولی است. شکل موج های توان DFIG، گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ لینک DC به ترتیب در شکل های ۱۸ (الف-ج) نشان داده شده اند. مشاهده می شود DFIG در طی کمبود ولتاژ عمیق و در مود فوق سنکرون پایدار باقی می ماند.



شکل (۱۷): (الف) جریان استاتور، (ب) جریان روتور DFIG (pu) برای حالت ششم



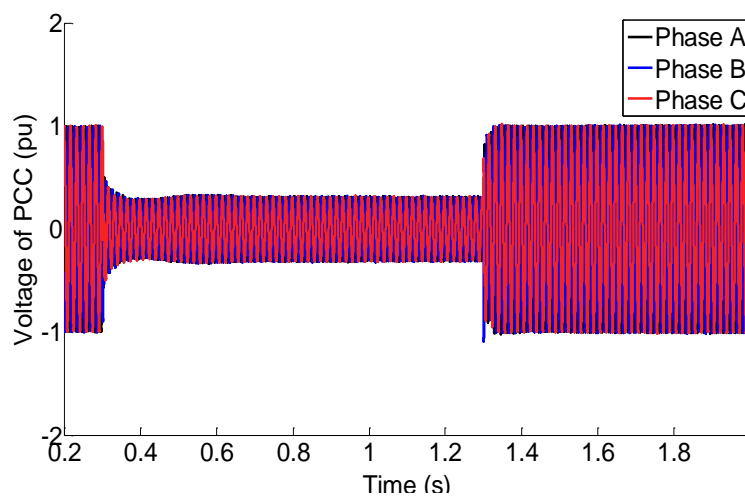
شکل (۱۸): (الف) توان DFIG (pu)، (ب) گشتاور الکترومغناطیسی (pu)، (ج) ولتاژ لینک DC (V) برای حالت ششم

### ۵-۷- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های متداول

روش پیشنهادی در این مقاله در طی کمبود ولتاژهای عمیق تکفاز و سه فاز بهتر از روش‌های موجود عمل می‌کند که دلیل این امر در نظر گرفتن یک مبدل سوم برای بهبود عملکرد DFIG در طی نامتعادلی ولتاژ و استفاده از روش کنترلی مناسب پیشنهادی است. ارزیابی مقدار کمبود ولتاژ، اضافه جریان روتور و استاتور و اضافه ولتاژ لینک DC این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند؛ برای مثال، در صورت استفاده از روش ارائه‌شده در این پژوهش به‌ازای کمبود ولتاژ ۹۰٪ فقط ۴٪ اضافه جریان به وجود می‌آید؛ در صورتی که روش مشخص‌شده در مرجع [۱۰] به ۵٪ اضافه جریان برای کمبود ولتاژ فقط ۳۳٪ منجر شده است. رویکرد پیشنهادشده در مرجع [۸]، غلبه بر کمبود ولتاژهای تا ۹۳٪ را مقدور کرد؛ در صورتی که روش ارائه‌شده در این پژوهش، اجازه حداکثر ۹۰٪ کمبود ولتاژ سه فاز و ۹۳٪ کمبود ولتاژ تکفاز را می‌دهد؛ باوجوداین، در صورت استفاده از رویکرد گزارش‌شده در مرجع [۸]، افزایش بیشتر از ۱۰۰٪ در اضافه جریان روتور و استاتور تحت کمبود ولتاژهای تکفاز و سه فاز یادشده لحاظ شده است.

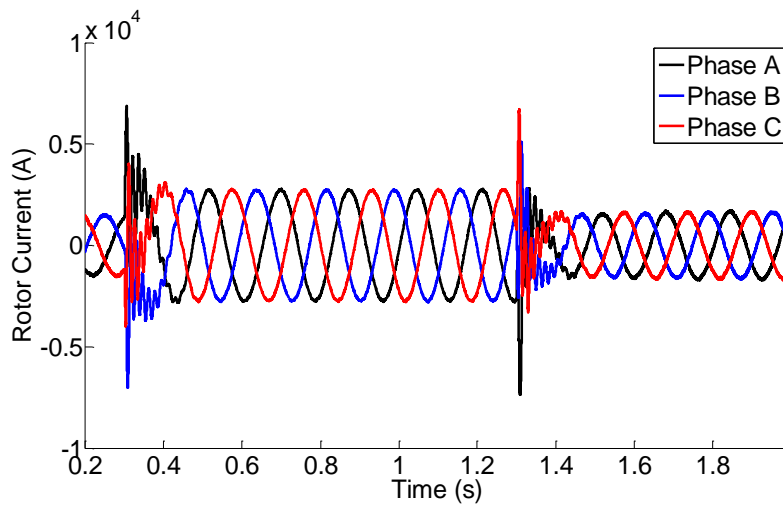
### ۵-۸- مقایسه رویکرد پیشنهادی با کنترلر PI

در این بخش برای نشان‌دادن عملکرد مناسب روش پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مبتنی بر PI، DFIG همانند حالت‌های قبلی در معرض کمبود ولتاژ ۹۰٪ قرار می‌گیرد. همان‌طور که اشاره شد، تکنیک‌های کنترلی مبتنی بر PI فقط در شرایط ولتاژ شبکه نرمال کار می‌کنند و در شرایط حادثه، عملکرد خوبی را از خود نشان نمی‌دهند؛ این مشکل با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله به مقدار زیادی رفع شده و احتمال آسیب‌رسیدن به ساختار DFIG به مقدار زیادی کاهش یافته است. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب ولتاژ PCC و جریان روتور DFIG را بدون استفاده از کنترلر نشان می‌دهند. شکل‌های (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) به ترتیب ولتاژ باس DFIG، جریان استاتور و جریان روتور DFIG با استفاده از کنترلر ISMC را نشان می‌دهند. شکل‌های (۲۴) و (۲۵) به ترتیب جریان روتور و جریان استاتور DFIG با استفاده از کنترلر PI را نشان می‌دهند و در نهایت شکل (۲۶) مقایسه گشتاور الکترومغناطیسی DFIG با استفاده از کنترلر PI و ISMC را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است رویکرد پیشنهادی در کنترلر DFIG و ممانعت آن از جداشدن از ریزشبکه نسبت به کنترل‌کننده PI، بسیار مؤثرتر است.

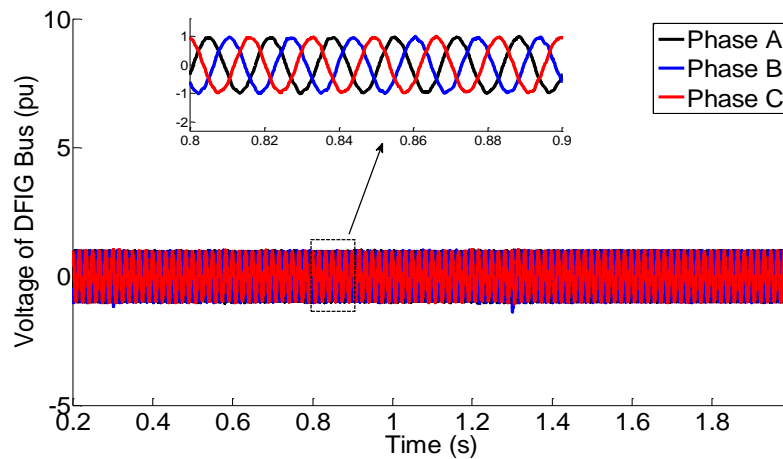


شکل (۱۹): ولتاژ نقطه PCC (pu) بدون استفاده از کنترلر

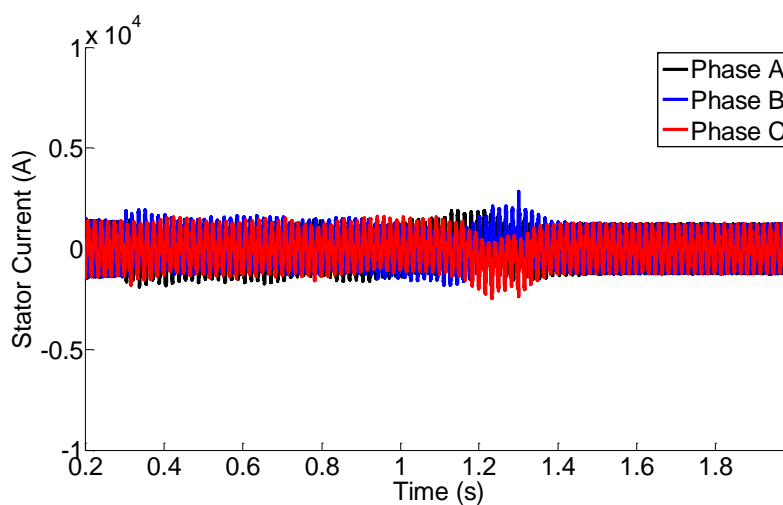




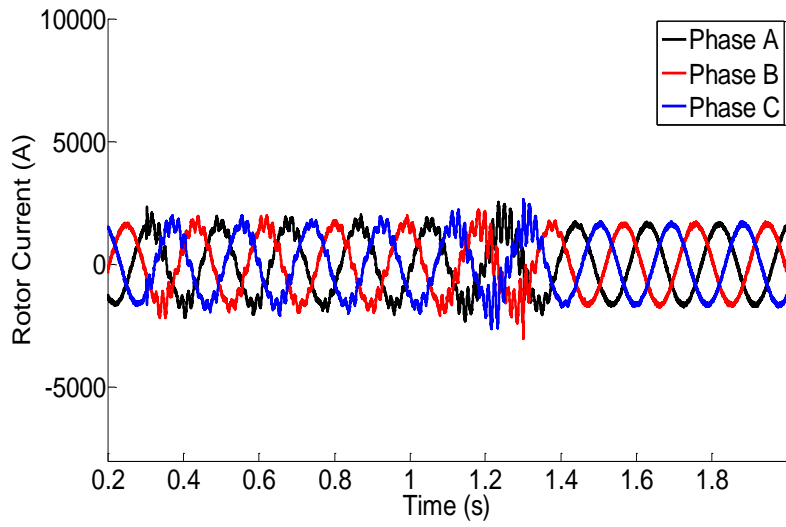
شکل (۲۰): جریان روتور DFIG بدون استفاده از کنترلر



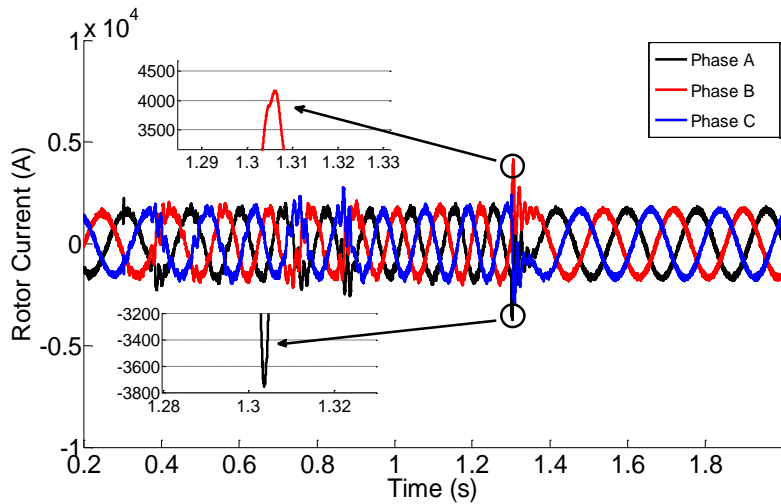
شکل (۲۱): ولتاژ یاس DFIG با استفاده از کنترلر ISMC



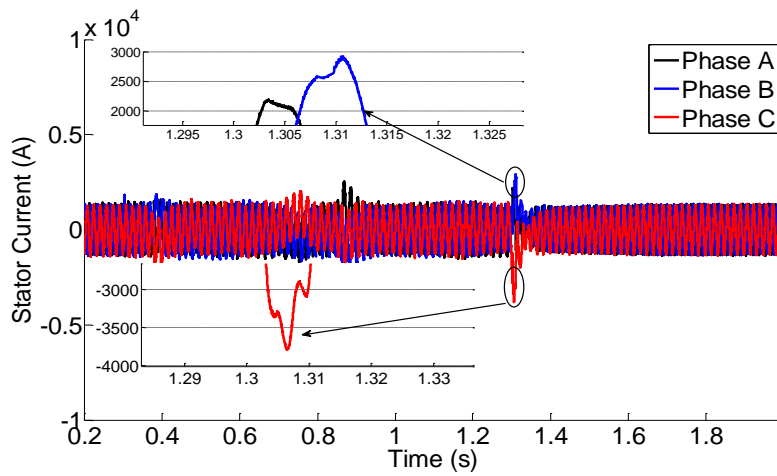
شکل (۲۲): جریان استاتور DFIG با استفاده از کنترلر ISMC



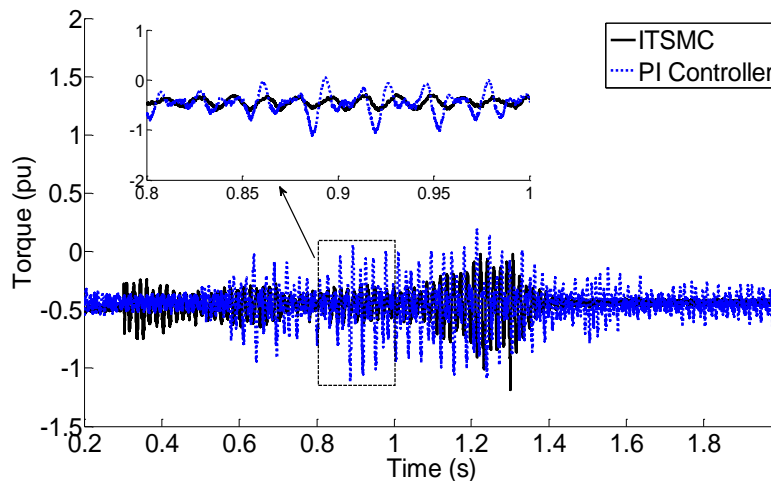
شکل (۲۳): جریان روتور DFIG با استفاده از کنترلر ISMC



شکل (۲۴): جریان روتور DFIG با استفاده از کنترلر PI



شکل (۲۵): جریان استاتور DFIG با استفاده از کنترلر PI



شکل (۲۶): مقایسه گشتاور الکترومغناطیسی DFIG با استفاده از کنترلر PI و ISMC.

کیفیت توان، استفاده از ترانس های الکترونیکی و پیاده سازی الگوریتم های شناسایی خطا اشاره کرد.

### ضمیمه الف:

جدول (الف-۱): پارامترهای ترانسفورماتور سری و فیلتر

Series transformer	
Rating/Voltage/Frequency	4.50 (MVA)/575(V)/60(Hz)
Total resistance/inductance	0.002(pu)/0.2021(pu)
Filter	
$R_f/L_f/C_f$	0.00 ( $\Omega$ )/ 0.13 (mH)/ 700.00 ( $\mu F$ )
Induction Machine	
Nominal Power/Voltage/Frequency	5.0 (MW)/575 (V)/60 (Hz)
Pairs of Pole	3
$R_s/L_s/M$	0.007060(pu)/0.1710(pu)/ 2.9000 (pu)
$R_r/L_r$	0.0050 (pu)/0.156 (pu)
$R_g/L_g$	0.19838 (m $\Omega$ )/ 0.052621 (mH)
Cut-in wind speed	4 (m/s)
Cut-out wind speed	16 (m/s)
Rated wind speed	12 (m/s)
DC-link:	
Nominal voltage/Capacitor of DC-link	1200(V)/ 0.03 (F)

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی کنترل انتگرال ترمینال مد لغزشی برای ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه با قابلیت گذر از شرایط حادثه پیشنهاد شده است. الگوی کنترلی پیشنهادی، DFIG را قادر به گذر از وقایع کمبود ولتاژ عمیق تحت شرایط عملکردی مختلف سنکرون، زیرسنکرون و فوق سنکرون می کند. عملکرد طرح کنترلی پیشنهادی با استفاده از شرایط عملکردی مختلف DFIG شامل شرایط نرمال و تحت کمبود ولتاژهای سه فاز و تکفاز به صورت گسترده تحلیل شد. طراحی با استفاده از مبدل سری سمت شبکه به منظور اجتناب از قطع DFIG از شبکه در طی شرایط خطا تکمیل شده است. با وجود قرارگرفتن DFIG در معرض مدهای مختلف عملکردی و شرایط خطای شدید، اضافه جریان های روتور و استاتور به مقدار زیادی کنترل شده که در مقایسه با رویکردهای موجود عملکرد بسیار خوبی است؛ بنابراین جریان ها و ولتاژهای DFIG در بازه های مورد مطالعه، کنترل شده و در نتیجه از صدمه به مبدل ها در طی شرایط مختلف خطا جلوگیری می شود. رویکرد پیشنهادی، DFIG را قادر به گذر از خطاها برای کمبود ولتاژهای متقارن و نامتقارن کرده است و اتصال مداوم آن به شبکه را تضمین می کند. در روش پیشنهادی، مسئله چترینگ برطرف شده است که از نقاط ضعف روش های قبلی مبتنی بر مود لغزشی بوده است. به عنوان پیشنهاد در ادامه پژوهش فوق می توان به تجمیع طرح پیشنهادی با الگوریتم های بهبود

## نمادگذاری:

## مراجع

- [1] J.J. Justo, F. Mwasilu, J.-W. Jung, Enhanced crowbarless FRT strategy for DFIGbased wind turbines under three-phase voltage dip, *Electr. Power Syst. Res*, Vol.142, pp. 215–226, 2017.
- [2] B.B. Ambati, P. Kanjiya, V. Khadkikar, A low component count series voltage compensation scheme for DFIG WTs to enhance fault ride through capability, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 30, No.1, pp.1–10, 2015.
- [3] S.W. Mohod, M.V. Aware, A STATCOM-Control scheme for grid connected wind energy system for power improvement, *IEEE Syst. J*, Vol. 4, No. 3, pp.346–352, 2010.
- [4] X. Yan, G. Venkataramanan, P.S. Flannery, Y. Wang, Q. Dong, B. Zhang, Voltage-sag tolerance of DFIG wind turbine with a series grid side passive-impedance network, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 25, No.4, pp.1048–1056, 2010.
- [5] S. Zhang, K. Tseng, S. Choi, T. Nguyen, D. Yao, Advanced control of series voltage compensation to enhance wind turbine ride through, *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 27, No. 2, pp. 763–772, 2012.
- [6] A. Ibrahim, T.H. Nguyen, D. Lee, S. Kim, A fault ride through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol.12, pp. 871–882, 2011.
- [7] C. Wessels, F. Gebhardt, F. Wilhelm Fuchs, Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults, *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 26, No.3, pp. 807–815, 2011.
- [8] I. Spyros, G. kavanoudis, C.S. Demoulias, FRT capability of a DFIG in isolated grids with dynamic voltage restorer and energy storage, *Proceedings of the IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 1–8, 2014.
- [9] P. Suppioni, A.P. Grilo, J.C. Teixe, Control methodology for compensation of grid voltage unbalance using a series-converter scheme for the DFIG, *Electr. Power Syst. Res*, Vol. 133, pp.198–208, 2016.
- [10] O. Abdel, B. Nasiri, A. Nasiri, Series voltage compensation for DFIG wind turbine low-voltage ride-through solution, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 26, No.1, pp.272–281, 2011.
- [11] S.I. Yannopoulos, G. Lyberatos, N. Theodossiou, W. Li, M. Valipour, A. Tamburrino, A.N. Angelakis, Evolution of water lifting devices (pumps) over the centuries worldwide, *Water*, Vol.7, pp. 5031–5060, 2015.
- [12] R. Peña, R. Cárdenas, J. Proboste, G. Asher, J. Clare, Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer, *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol. 55, pp. 330–339, 2008.
- [13] J. Hu, H. Nian, B. Hu, Y. He, Z.Q. Zhu, Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 25, No. 4, pp. 1028–1039, 2010.
- $PCC$  نقطه اتصال مشترک.
- $d(q)$  محور مستقیم (متعامد).
- $s(r)$  زیرنویس استاتور (روتور).
- $\alpha, \beta$  قاب مرجع ساکن.
- $R_g(L_g)$  مقاومت (اندوکتانس) مبدل سمت شبکه.
- $R_s(L_s)$  مقاومت (اندوکتانس) استاتور DFIG.
- $R_r(L_r)$  مقاومت (اندوکتانس) روتور DFIG.
- $M$  اندوکتانس متقابل بین استاتور و روتور DFIG.
- $i_{rdq-ref}$  جریان مرجع روتور DFIG در قاب مرجع d-q.
- $i_{gdq-ref}$  جریان مرجع مبدل سمت شبکه DFIG در قاب مرجع d-q.
- $s$  لغزش.
- $V_r(i_r)$  ولتاژ (جریان) روتور DFIG.
- $V_s(i_s)$  ولتاژ (جریان) استاتور DFIG.
- $V_g(i_g)$  ولتاژ (جریان) سمت شبکه DFIG.
- $V_{SE}$  ولتاژ جبران ساز تزریق شده توسط SGSC.
- $\omega_r(\omega_s)$  سرعت مکانیکی (سنکرون) DFIG.
- $\varphi_s(\varphi_r)$  شار استاتور (روتور).
- $R_f, L_f, C_f$  مقاومت، اندوکتانس و خازن فیلتر اینورتر سری.
- $e(g)$  نماد اختصاصی برای متغیر سمت روتور (شبکه).
- $S(\sigma)$  سطح (منیفولد) کنترل کننده مد لغزشی.
- $\alpha_{d,q}, \beta_{d,q}$  ثوابت مثبت تعریف شده در منیفولد مد لغزشی.
- $K_1, K_2, K_3$  ثوابت مثبت تعریف شده در قانون کنترل.
- $\xi$  ماکزیمم حد شار استاتور برای شرایط نامتعادل.
- $v_{\alpha\beta inj}$  ولتاژ تزریق شده توسط SGSC در قاب مرجع ساکن.
- $v_{\alpha\beta actual}$  ولتاژهای واقعی شبکه در قاب مرجع ساکن.
- $v_{\alpha\beta desired}$  ولتاژهای مطلوب شبکه در قاب مرجع ساکن.
- $v_{\alpha\beta inj-dif}$  ولتاژهای مرجع SGSC در قاب مرجع ساکن.

- [21] M. Valipour, M.E. Banihabib, S.M.R. Behbahani, Comparison of the ARMAARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir, *J. Hydrol.* Vol.476, pp. 433–441, 2013.
- [22] M. Valipour, Critical areas of Iran for agriculture water management according to the annual rainfall, *Eur. J. Sci. Res.*, Vol. 84, No. 4, pp. 600–608, 2012.
- [23] M. Valipour, Temperature analysis of reference evapotranspiration models, *Meteorol. Appl.*, Vol. 22, No.3, pp. 385–394, 2015.
- [24] H.C. So, Y.S. Lee, M.H.L. Chow, Design of a 1-kVA parallel-type AC voltage sag compensator, *IET Power Electron*, Vol. 5, No. 5, pp. 591–599, 2012.
- [25] M.K. Dosoglu, A new approach for low voltage ride through capability in DFIG based wind farm, *Electr. Power Energy Syst*, Vol. 83, pp. 251–258, 2016.
- [26] EirGrid Grid Code. Ver. 3.5, EirGrid plc, Ireland, 2011.
- [27] F. Katiraei, M.R. Iravani, P.W. Lehn, Microgrid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process, *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 20, NO.1, PP. 248–257, 2005.
- [28] M.J. Morshed, A. Fekih, Integral terminal sliding mode control to provide fault ride-through capability for a grid connected wind turbine driven DFIG, *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp.1059–1064, 2015.
- [29] Y. Mishra, S. Mishra, F. Li, Z. Dong, R. Bansal, Small-signal stability analysis of a DFIG-based wind power system under different modes of operation, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 24, No. 42, pp. 972–982, 2009.
- [14] S. Swain, P.K. Ray, Short circuit fault analysis in a grid connected DFIG based wind energy system with active crowbar protection circuit for ride through capability and power quality improvement, *Electr. Power Energy Syst*, Vol. 84, pp. 64–75, 2017.
- [15] F.J. Chang, E.C. Chang, T.J. Liang, J.F. Chen, Digital-signal-processor-based DC/AC inverter with integral-compensation terminal sliding-mode control, *IET Power Electron*, Vol.4, No.1, pp.159–167, 2011.
- [16] H. Huerta, A.G. Loukianov, J.M. Canedo, Robust multimachine power systems control via high order sliding modes, *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 81, pp.1602–1609, 2011.
- [17] X. Li, X. Yu, Q.L. Han, Stability analysis of second order sliding mode control systems with input-delay using poincar map, *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol.58, No. 9, pp. 2410–2415, 2013.
- [18] Y. Ayoubia, M. Elsieda, A. Oukaoura, H. Chaouib, Y. Slamania, H. Gualous, Four-phase interleaved DC/DC boost converter interfaces for super-capacitors in electric vehicle application based on advanced sliding mode control design, *Electr. Power Syst. Res.*, Vol.134, pp. 186–196, 2016.
- [19] B. Beltran, M.E.H. Benbouzid, T. Ahmed-Ali, Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine, *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol.27, No. 2, pp. 261–269, 2012.
- [20] S. Mondal, C. Mahanta, Adaptive second order terminal sliding mode controller for robotic manipulators, *J. Franklin Inst.*, Vol. 351, pp. 2356–2377, 2014.