

## ADRC nonlinear auxiliary model and simplified NADRC model for DFIG-WT during grid voltage imbalance

M.A.Karami<sup>1</sup>, S.M.Shariatmadar<sup>2\*</sup>, M.E.Nazari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering Golpayegan College of Engineering Isfahan University of Technology Golpayegan, Iran

### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 11 May 2020

Received in revised form: 27 June 2020

Accepted: 17 August 2020

Available online: 23 August 2020

**Keywords:** Wind turbine, DFIG generator, grid disturbances, MA-NADRC method

### ABSTRACT

This paper presents an innovative approach for control based on MA-NADRC combined with the Least Mean Error (LM) method to regulate rotor current. The LM method, through precise analysis and optimal reactive current extraction in a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), contributes to minimizing the system's overall losses. The MA-NADRC controller, leveraging rotor model information in the auxiliary control section and accounting for magnetic inductance variations, demonstrates superior performance. This design enhances the power delivered to the grid and strengthens the system's resilience against disturbances. Additionally, a novel method for fine-tuning MA-NADRC parameters is introduced. Simulations were conducted in MATLAB/Simulink under various operational conditions. Under balanced voltage sag conditions of 0.1 per unit, MA-NADRC recorded a settling time of 0.12 seconds and an overshoot of 1.0% for the rotor current, while first-order NADRC showed a settling time of 0.20 seconds and an overshoot of 4.3%, and LADRC demonstrated a settling time of 0.30 seconds and an overshoot of 0.0%. At high wind speeds (10 m/s), MA-NADRC exhibited superior performance with an overshoot of 2.1% and a settling time of 0.10 seconds, compared to first-order NADRC with an overshoot of 0.0% and a settling time of 0.30 seconds. Moreover, the maximum DC-link voltage amplitude for MA-NADRC was calculated to be 1.0 per unit, while it was 1.2 per unit for first-order NADRC. These results underscore the superiority of MA-NADRC in dynamic system management, reducing oscillations, and improving performance under diverse operating conditions.

**Cite this article:** M.A.Karami, S.M.Shariatmadar, M.E.Nazari "ADRC nonlinear auxiliary model and simplified NADRC model for DFIG-WT during grid voltage imbalance" *AppliedElectromagnetics*, vol. 13(1), pp. 1-12, 2020. DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.10.1.1.26450103.14.13.1.4.9>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein

## مدل کمکی غیر خطی ADRC و مدل ساده شده NADRC برای DFIG-WT در هنگام عدم

### تعادل و لتاژ شبکه

محمدعلی کرمی<sup>۱</sup>، سید محمد شریعت مدار<sup>۲\*</sup>، محمد اسماعیل نظری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه برق، دانشکده فنی مهندسی - برق، دانشگاه آزاد واحد خمین، خمین، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی - برق، دانشگاه آزاد واحد خمین، خمین، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه برق دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلپایگان، گلپایگان، ایران

#### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

#### چکیده

در این مقاله، یک رویکرد نوآورانه برای کنترل مبتنی بر MA-NADRC به همراه روش حداقل سازی خطا (LM) جهت تنظیم جریان روتور ارائه شده است. روش LM با تحلیل دقیق و استخراج مقدار بهینه جریان راکتیو در ژنراتور القایی دوستغذیه (DFIG)، به کاهش تلفات کلی سیستم کمک می کند. کنترل کننده MA-NADRC با بهره گیری از اطلاعات مدل روتور در بخش کمکی کنترل و در نظر گرفتن تغییرات اندوکتانس مغناطیسی، عملکرد بهتری را به نمایش می گذارد. این طراحی، توان تحویلی به شبکه را افزایش داده و مقاومت سیستم در برابر اختلالات را تقویت می کند. همچنین، روشی نوین برای تنظیم دقیق پارامترهای MA-NADRC معرفی شده است. تمامی شبیه سازی ها در محیط سیمولینک MATLAB و در شرایط مختلفی عملیاتی انجام شده اند. در شرایط افت ولتاژ متعادل ۰.۱۵ پرینیت، کنترل MA-NADRC زمان نشست ۰.۱۲ ثانیه و فرا جهش ۱.۵٪ را برای جریان روتور ثبت کرد، در حالی که روش NADRC مرتبه اول زمان نشست ۰.۲۵ ثانیه و فرا جهش ۳/۴٪ و روش LADRC زمان نشست ۰.۳۰ ثانیه و فرا جهش ۰.۵٪ را نشان دادند. در سرعت باد بالا (۱۵ متر بر ثانیه)، MA-NADRC عملکرد بهتری داشت و فرا جهش ۱/۲٪ با زمان نشست ۰.۱۵ ثانیه را به ثبت رساند، در حالی که NADRC مرتبه اول فرا جهش ۵.۵٪ و زمان نشست ۰.۳۵ ثانیه را نشان داد. همچنین، مقدار حداکثر دامنه ولتاژ لینک DC برای MA-NADRC برابر با ۱.۰۵ پرینیت و برای NADRC مرتبه اول ۱.۲۵ پرینیت محاسبه شد. این نتایج بیانگر برتری MA-NADRC در مدیریت دینامیک سیستم، کاهش نوسانات، و بهبود عملکرد تحت شرایط مختلف بهره برداری است.

#### کلید واژه ها:

توربین بادی، ژنراتور DFIG، اختلالات شبکه، روش MA-NADRC

استناد: کرمی، محمدعلی، شریعت مدار، سید محمد، نظری، محمد اسماعیل. مدل کمکی غیرخطی ADRC و مدل ساده شده NADRC

برای DFIG-WT در هنگام عدم تعادل ولتاژ شبکه. الکترومغناطیس کاربردی. ۱۳(۱): ۱۲-۱. ۱۴۰۴.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۰۱۳.۱۴۰۴.۱۳.۱.۴.۹>:

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).



## ۱- مقدمه

همانگ برای ژنراتور القایی بدون جاروبک باهدف مقابله با ولتاژ نامتعادل شبکه انجام داده‌اند. در [۱۱] با استفاده از کنترل پیش‌بین غیرخطی، عملکرد DFIG را تحت شرایط نامتعادل بهبود داده‌اند. در [۱۲-۱۳] به کنترل و اتصال DFIG به شبکه در مواجهه با ولتاژ نامتعادل و بررسی استراتژی‌های مربوط به این شرایط پرداخته‌اند. این مطالعات نشان‌دهنده اهمیت و پیشرفت در راهبردهای کنترلی برای افزایش تاب‌آوری و بهبود عملکرد DFIG در شرایط شبکه‌ای مختلف است.

در این مقاله، یک رویکرد نوآورانه کنترل مبتنی بر روش ( $MA-NADRC^3$ ) ارائه شده است که با استفاده از روش حداقل سازی تلفات ( $LM^4$ ) جریان روتور را تنظیم می‌کند. در روش NADRC با بهره‌گیری از یک ناظر غیرخطی، اغتشاشات داخلی و خارجی سیستم را به صورت آنلاین تخمین زده و آن‌ها را در کنترل‌کننده جبران می‌کند. این روش به دلیل ساختار تطبیقی و انعطاف‌پذیر، در بهبود دقت و پایداری سامانه‌ها در شرایط غیرخطی موفق عمل می‌کند. روش LM با تعیین مقدار بهینه مرجع برای جریان راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه به کاهش تلفات کلی سیستم کمک می‌کند. ساختار MA-NADRC با ادغام داده‌های مدل روتور در طراحی کنترلر و لحاظ نمودن اثر تغییرات اندوکتانس مغناطیسی بهبود یافته است. این راهکار نه تنها توان انتقالی به شبکه را افزایش می‌دهد، بلکه تاب‌آوری سیستم در برابر اختلالات را نیز بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، یک روش پیشرفته برای تنظیم دقیق پارامترهای MA-NADRC معرفی شده که موجب بهینه‌سازی عملکرد کلی سیستم می‌شود.

در ادامه مقاله در بخش دوم، در بخش یک کنترل‌کننده رد اغتشاش اکتیو ( $ADRC^5$ ) برای بهبود عملکرد سامانه‌های مبتنی بر ژنراتور القایی دو تغذیه‌ای DFIG در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه پیشنهاد شده است. ابتدا، ساختار کلی کنترل‌کننده ADRC و نسخه خطی آن که برای مقابله با اغتشاشات ساده طراحی شده است، معرفی می‌شود. سپس، نسخه غیرخطی و پیشرفته این کنترل‌کننده به کمک مدل پیشنهادی و با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای سیستم، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده، روشی نوآورانه ارائه شده که عملکرد سیستم را در شرایط مختلف بهبود می‌بخشد. در بخش سوم، نتایج شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش،

ولتاژهای نامتعادل می‌توانند باعث ایجاد نوسانات توان، افزایش تنش‌های حرارتی در تجهیزات، و کاهش عمر مفید سیستم شوند. این شرایط همچنین موجب تحمیل نوسانات فرکانس مضاعف بر گشتاور ژنراتورهای توربین‌های بادی و ایجاد اختلالات در عملکرد پایدار سیستم می‌شود. ژنراتور القایی دو سو تغذیه در توربین‌های بادی ( $DFIG-WT^1$ ) با استفاده از سیم‌پیچی استاتور که به شبکه متصل است و سیم‌پیچی روتور که از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت کنترل می‌شود، امکان تنظیم جریان و توان اکتیو و راکتیو را فراهم می‌کنند.

کنترل مستقل این دو نوع توان، بهره‌وری انرژی را افزایش داده و انعطاف‌پذیری سیستم در شرایط مختلف بار و باد را بهبود می‌بخشد. کنترل توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه ( $DFIG^1$ ) تحت شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه، به‌عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در طراحی و بهره‌برداری این سامانه‌ها شناخته می‌شود. در این زمینه مطالعات متعددی انجام شده است و از روش‌های کنترلی گوناگونی برای این منظور ارائه شد [۱].

در [۲] با ارائه رویکردی برای کنترل بهینه توان، به بهبود عملکرد DFIG در مواجهه با ولتاژ نامتعادل پرداخته است. Cheng و همکاران [۳] بر کنترل هماهنگ دو هدفه برای ژنراتور القایی بدون جاروبک تحت شرایط ولتاژ نامتعادل تمرکز کرده‌اند. در مطالعات دیگر، در [۴] الگوریتمی یکپارچه برای شناسایی سریع افت ولتاژ و بهبود قابلیت ماندگاری در ولتاژ پایین ( $LVRT^2$ ) برای DFIG پیشنهاد کرده‌اند. در [۵] یک روش پیش‌بینانه قدرت سه‌برداری مبتنی بر مشاهده‌گر حالت خطی را برای کنترل قدرت در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه توسعه داده‌اند. در [۶] راهبرد کنترلی برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های مبتنی بر DFIG در مواجهه با ولتاژ نامتعادل ارائه کرده‌اند. همچنین، در [۷] رویکردی دینامیکی برای کنترل توان بادی DFIG جهت کاهش اثرات نامتعادل ولتاژ شبکه توسعه داده‌اند. در زمینه مدل‌سازی، در [۸] یک مدل برای مدیریت ولتاژ نامتعادل و تعریف‌شده شبکه متصل به DFIG ارائه کرده‌اند. از سوی دیگر، در [۹] با استفاده از رویکردی مبتنی بر یکپارچه‌سازی تعمیم‌یافته، کنترل بهبود یافته‌ای برای DFIG در شرایط نامتعادل شبکه پیشنهاد داده‌اند. در [۱۰] طراحی کنترل

<sup>۳</sup>- Model-Adaptive Nonlinear Active Disturbance Rejection Control.

<sup>۴</sup>- Loss Minimization.

<sup>۵</sup>- Active Disturbance Rejection Control.

<sup>۱</sup>- Doubly-Fed Induction Generation Wind Turbine.

<sup>۲</sup>- Low Voltage Ride-Through.

$$\dot{y} = g(t, y, d, w) + bu \quad (2)$$

که در آن  $g$  دینامیک سیستم که شامل متغیر زمانی  $(t)$ ، اختلال خارجی  $(d)$  و عدم قطعی‌های دینامیکی در سیستم  $(w)$  است و  $b$  بهره ورودی کنترلی است که مقدار آن ممکن است برای سیستم ناشناخته باشد. بهره ورودی کنترل  $b$  را می‌توان به صورت  $b = b_0 + \Delta b$  تعریف کرد.

که در آن  $b$  قسمت شناخته شده  $b$  و  $\Delta b$  یک خطای مدل سازی ریاضی پیش‌بینی و یا عدم قطعیت پارامترها را نشان می‌دهد. با ترکیب تابع  $g$  و قسمت مجهول  $\Delta bu$  یک اختلال به اصطلاح تعمیم یافته،  $f$  ایجاد می‌شود. سپس، معادله (۲) را می‌توان به صورت (۳) بیان کرد.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \\ x_2 = f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

مشاهده گر که به عنوان مشاهده گر حالت توسعه یافته خطی (LESO) به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (4)$$

که در آن  $z_1$  تخمین خروجی سیستم یعنی  $x_1$  یا  $y$  است،  $z_2$  تخمین کل اختلال  $x_2$  یا  $f$  است،  $e$  خطای بین  $z_1$  و  $y$  است،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  بهره‌های مشاهده گر LESO می‌باشند. بهره‌های مشاهده گر بر اساس روش پارامتر سازی با استفاده از روش جایابی قطب و طبق یک قانون مشترک به صورت زیر انتخاب می‌شوند.

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_0 \\ \beta_2 = \omega_0^2 \\ \omega_0 = (3 \square 5)\omega_c \end{cases} \quad (5)$$

که در آن  $\omega_0$  پهنای باند مشاهده گر و  $\omega_c$  پهنای باند حلقه بسته مورد نیاز می‌باشند. به طور کلی، بهینه سازی پهنای باند مشاهده گر  $\omega_0$  به انتخاب مقدار زیادی از  $\omega_0$  برمی‌گردد. باین حال، پهنای باند بزرگ مشاهده گر نویز بیشتری را در سیستم کنترل شده ایجاد می‌کند. بنابراین، مصالحه‌ای بین عملکرد ردیابی و نوسانات سیستم باید در نظر گرفته شود، به طوری که یک پهنای باند مناسب برای مشاهده گر باید

عملکرد کنترل کننده در دو معیار اصلی شامل قابلیت ردیابی مرجع و عملکرد در شرایط افت ولتاژ ارزیابی شده است. در نهایت این مقاله با ارائه، جمع بندی و نتیجه گیری از یافته‌ها در بخش چهارم به پایان می‌رسد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- روش کنترل رد اغتشاش فعال

برای بهترین عملکرد روش LM در توربین‌های بادی دو سو تغذیه DFIG-WT، کنترل کننده سمت روتور ( $RSC^r$ ) باید مقادیر مرجع جریان روتور را به صورت صاف و سریع ردیابی کند. علاوه بر این، باید هر دو اختلالات داخلی و خارجی سیستم را رد کند. مدل ریاضی جریان‌های محورهای dq روتور را می‌توان به صورت یک سیستم دینامیکی مرتبه یک بیان کرد [۱۴]:

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} v_{dr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{dr} - \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} \frac{d\lambda_{ds}}{dt} + \frac{\omega_{sl}}{\sigma L_r} \lambda_{qr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} v_{qr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{qr} - \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} \frac{d\lambda_{qs}}{dt} - \frac{\omega_{sl}}{\sigma L_r} \lambda_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

در آن  $(\sigma = L_m^2 / L_s L_r)$  ضریب نشتی است. به عنوان مثال، برای جریان محور  $d$  روتور، پارامترهای DFIG ممکن است بر اثر دما، اثر پوستی، اشباع و غیره متغیر باشند. بنابراین عبارت  $R_r / \sigma L_r$  را می‌توان به عنوان یک اختلال درونی در نظر گرفت. باین حال، در طول اختلالات شبکه، شار استاتور ثابت نیست، بنابراین، عبارت  $(d\lambda_{ds}/dt)$ ،  $(L_m / \sigma L_s L_r)$  را می‌توان به عنوان یک اختلال خارجی در نظر گرفت. علاوه بر این، عبارت غیرخطی  $(\omega_{sl} / \sigma L_r \lambda_{qr})$  یک اختلال در نظر گرفته می‌شود زیرا طراحی کنترل جداسازی بر اساس دانش دقیق پارامترهای مدل است. همه این عدم قطعی‌ها و غیرخطی بودن‌ها می‌تواند عملکرد کنترل کننده را کاهش دهد. بنابراین، باید از یک کنترل کننده قوی برای هدایت جریان روتور DFIG استفاده شود. در بخش‌های فرعی زیر، استراتژی‌های مختلف ADRC که قبلاً مطالعه شده‌اند و روش ADRC پیشنهادی ارائه شده‌اند.

### ۲-۲- روش کنترل رد اغتشاش فعال خطی

برای طراحی LADRC مرتبه اول، یک سیستم مرتبه اول در نظر گرفته شده است که می‌توان آن را به صورت معادله (۲) بیان کرد [۱۵]:

$$\begin{cases} e_{d1} = z_{d1} - i_{dr} \\ \dot{z}_{d1} = z_{d2} - \beta_1 fal(e_{d1}, \alpha_{d1}, \delta_{d1}) + f_d + b_0 u_{dr} \\ \dot{z}_{d2} = -\beta_2 fal(e_{d1}, \alpha_{d1}, \delta_{d1}) \end{cases} \quad (9)$$

همچنین، NSEF در NADRC معمولی به صورت زیر تنظیم می شود:

$$\begin{cases} e_{d2} = i_{dr}^* - z_{d1} \\ u_0 = kfal(e_{d2}, \alpha_{d2}, \delta_{d2}) \\ u_{dr}^* = (u_0 - (f_d + z_{d2})) / b_0 \end{cases} \quad (10)$$

در مقایسه با NESO معمولی، با استفاده از عبارت مدل کمکی  $f_d$ ، پهنای باند مدل کمکی (MA-NESO) را می توان کاهش داد، بنابراین سرعت پاسخ بالاتری را می توان به دست آورد. علاوه بر این، در DF-IG-WT ها، اندوکتانس مغناطیسی بالاترین مقدار را در مقایسه با سایر پارامترهای DF-IG دارد، بنابراین شناسایی مقدار درست آن برای اطمینان از کارایی کنترل مهم است.

علاوه بر این، با توجه به ولتاژ اعمال شده به استاتور، اندوکتانس مغناطیسی  $L_m$  بسته به سطح اشباع DF-IG می تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد. در عملکرد عادی، تا زمانی که ولتاژ در استاتور پایدار باشد،  $L_m$  تقریباً ثابت می ماند. با این حال، در طول اختلالات شبکه، ولتاژ استاتور تغییر خواهد کرد که به این معنی است که مقدار  $L_m$  دیگر ثابت نیست. به دلیل این حقایق، یک الگوریتم شناسایی آنلاین برای اندوکتانس مغناطیسی ارائه شده است. مقدار شار مغناطیسی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۷]:

$$\lambda_m = \sqrt{\lambda_{\alpha s}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \quad (11)$$

مؤلفه های شار مغناطیسی را می توان در یک قاب مرجع ثابت به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{cases} \lambda_{\alpha s} = \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt - L_{ls} i_{\alpha s} \\ \lambda_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt - L_{ls} i_{\beta s} \end{cases} \quad (12)$$

تا زمانی که منحنی مغناطیسی مشخص باشد، مقدار جریان مغناطیسی  $i_m$  را می توان به دست آورد. داده های منحنی اشباع بدون بار در بلوک *Asynchronous Machine p.u.* از کتابخانه *MATLAB/Simulink* برای شبیه سازی

انتخاب شود. با طراحی مناسب LESO،  $z_1$  و  $z_2$  به ترتیب  $y$  و  $f$  را ردیابی می کنند. قانون کنترل به صورت زیر ارائه می شود [۱۶]:

$$u = \frac{u_0 - z_2}{b_0} \quad (6)$$

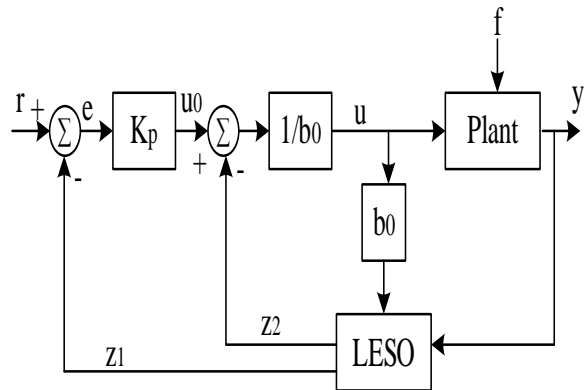
مدل اصلی به یک انتگرال گیر با بهره واحد کاهش می یابد:

$$\dot{y} = u_0 \quad (7)$$

که به راحتی توسط یک کنترل کننده تناسبی ساده کنترل می شود:

$$u_0 = k_p (r - z_1) \quad (8)$$

که  $r$  سیگنال مرجع ورودی برای ردیابی است. شکل (۱) ساختار LADRC مرتبه اول را نشان می دهد.



شکل (۱). بلوک دیاگرام کنترل کننده LADRC مرتبه اول [۱۶]

### ۳-۲- روش کنترل رد اغتشاش فعال غیرخطی

اطلاعات مدل سیستم موجود را می توان برای کاهش زمان تخمین NESO (یعنی مقادیر کمتر بهره مشاهده گر) استفاده کرد و توانایی رد اختلال را بهبود می بخشید. بر این اساس، مدل  $f_d$  به عنوان یک قسمت کمکی برای مدل در نظر گرفته می شود که در NESO تعبیه شده و برای دستیابی به خروجی مورد نظر در قانون کنترل ادغام شده است. MA-NADRC پیشنهادی برای تنظیم جریان های روتور DF-IG طراحی شده است که در آن طراحی NESO در NADRC معمولی به صورت زیر تنظیم می شود:

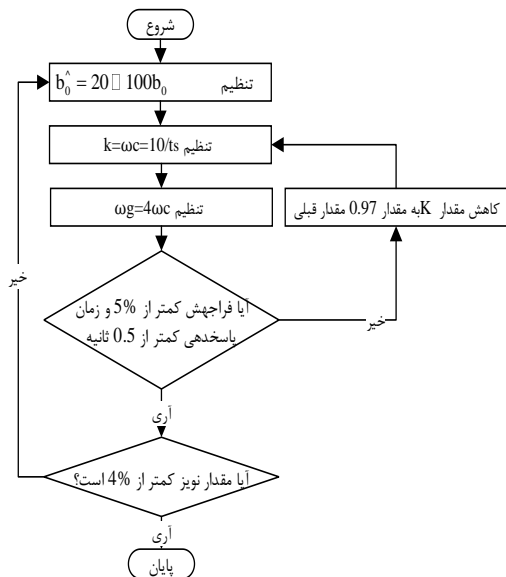
۱. ابتدا، بهره ورودی کنترل  $b$  را می‌توان با پارامترهای سیستم تعیین کرد، یعنی  $b = 1/\sigma L_r$ ، و ابتدا باید ثابت باشند. به منظور افزایش دامنه پایدار پهنای باند مشاهده‌گر، مقدار  $b$  برای تقریب بالاتر به صورت  $b = (20 \sim 100)$  توصیه می‌شود (با کوچک‌ترین مقدار  $b$  یعنی ۲۰ شروع می‌شود).

۲. هر دو پهنای باند حلقه بسته  $\omega_c$  و بهره کنترل‌کننده  $k$  با توجه به زمان نشست مورد نظر  $t_s$  به صورت  $k = \omega_c = 10/t_s$  تنظیم شوند.

۳. هر دو  $k$  و  $\omega_c$  ثابت شوند و سپس پهنای باند مشاهده‌گر را می‌توان به صورت  $\omega_c = 4\omega$  بر اساس یک قاعده عمومی مشترک، یعنی  $\omega_c = (3 \sim 5)\omega$  تنظیم کرد. بر این اساس، بهره مشاهده‌گر را می‌توان به صورت  $\omega_c = 2\beta$  و  $\omega_c = \beta$  تنظیم کرد.

۴. کاهش مقدار بهره کنترل  $k$  به یک مقدار مناسب به منظور رسیدن به سرعت پاسخ مورد نظر در سیستم همراه با یک فرا جهش کوچک.

اگر این پارامترها می‌توانند عملکرد کنترلی رضایت بخشی را تضمین کنند، به عنوان مثال، نداشتن فرا جهش، زمان نشست کم و حساسیت کم به نویز سیستم، آنگاه تنظیم می‌تواند متوقف شود. در غیر این صورت، مقدار بیشتری از بهره ورودی  $b$  را انتخاب کنید و مراحل (۱) تا (۴) را در فرآیند تنظیم تکرار کنید.



شکل (۳). نمودار جریان روش تنظیم MA-NADRC [۱۸]

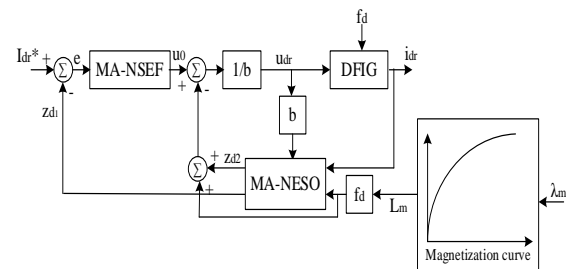
### ۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌ها

برای ارزیابی عملکرد دینامیکی استراتژی کنترل پیشنهادی یک مزرعه بادی با شش توربین بادی DFIG، ۱.۵ مگاواتی در MATLAB/Simulink مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. DFIG شبیه‌سازی شده از یک ژنراتور القایی روتور

اشباع شار اصلی آورده شده است. اکنون، اندوکتانس مغناطیسی اشباع  $L_m$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$L_m = \frac{\lambda_m}{i_m} \quad (۱۳)$$

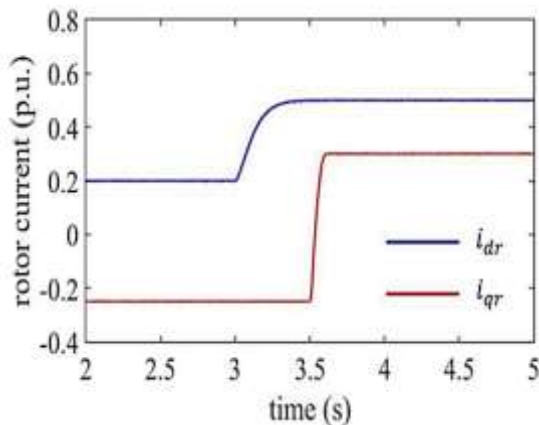
به دلیل اشباع شار اصلی، اندوکتانس مغناطیسی ممکن است کاهش یابد و در نتیجه، پایداری گذرا DFIG را می‌توان افزایش داد. علاوه بر این، اگر مقدار اندوکتانس مغناطیسی در کنترلر دقیقاً مشخص نشده باشد، عملکرد سیستم می‌تواند کاهش یابد. بنابراین، در این مطالعه، تغییرات  $L_m$  در بخش مدل کمکی MA-NADRC گنجانده شده است. با انجام این کار، MA-NADRC پیشنهادی با  $L_m$  اشباع شده می‌تواند عملکرد گذرای DFIG را در طول اختلالات شبکه بهبود بخشد. ساختار کنترل MA-NADRC پیشنهادی با  $L_m$  اشباع برای کنترل جریان محور  $d$  روتور DFIG در شکل (۲) نشان داده شده است.



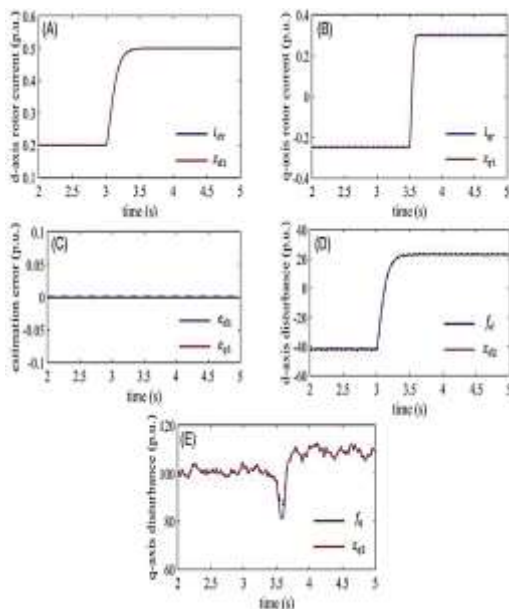
شکل (۲). بلوک دیاگرام MA-NADRC پیشنهادی با  $L_m$  اشباع برای کنترل جریان محور  $d$  روتور DFIG

### ۲-۴- روش پیشنهادی تنظیم ضرایب کنترل‌کننده

MA-NADRC پیشنهادی بر اساس ترکیبی از روش‌های تنظیم قبلی ADRC معمولی تنظیم می‌شود. سپس در چند مرحله، روش تنظیم برای ارائه پارامترهای دقیق‌تر بر اساس آزمون‌های سعی و خطا ایجاد می‌شود. روش تنظیم پیشنهادی می‌تواند برای هر سیستم دینامیکی خطی یا غیرخطی اعمال شود. از (۹) و (۱۰) می‌توان دریافت که MA-NADRC پیشنهادی شامل هشت پارامتر تنظیم یعنی  $\alpha_{d1}, \delta_{d1}, \alpha_{d2}, \delta_{d2}, k, \beta_1, \beta_2$  و  $b$  است. برخی از پارامترهای MA-NADRC مقادیر تجربی خود را دارند، به عنوان مثال  $\alpha_{d1}, \delta_{d1}, \alpha_{d2}$  و  $\delta_{d2}$  برای ارائه عملکرد بهتر در برابر اختلالات و عدم قطعیت، این پارامترها را می‌توان به صورت زیر تنظیم کرد:  $\alpha_{d2} = 0.75 \cdot 10^5$  و  $\delta_{d1} = \delta_{d2} = 10$ . روش تنظیم پیشنهادی پارامترهای باقیمانده در شکل (۳) نشان داده شده است و می‌توان آن را در مراحل زیر خلاصه کرد:



شکل (۴). عملکرد واقعی ردیابی جریان روتور با استراتژی کنترل MA-NADRC پیشنهادی



شکل (۵). ارزیابی عملکرد MA-NESO پیشنهادی: (الف) جریان محور d، روتور، (ب) جریان محور q روتور، (ج) خطای تخمین، (د) اختلال در محور d، (ه) اختلال در محور q

### ۳-۲- عملکرد روش کنترلی در شرایط ولتاژ پایین

به منظور بررسی عملکرد کنترل MA-NADRC پیشنهادی در طول افت ولتاژ شبکه، فرآیند گذرای DF-IGT با ضریب توان واحد به تفصیل تجزیه و تحلیل شده است. یک خطای متعادل به مدت ۶۲۵ میلی ثانیه به شبکه PCC اعمال می شود که منجر به افت ولتاژ ۰/۱۵ p.u. در استاتور DF-IGT می شود. برای مقایسه قابلیت LVRT در سرعت های باد کم و بالا، چهار استراتژی کنترلی مختلف برای کنترل RSC بررسی می شوند. این استراتژی ها که قابلیت LVRT را ارزیابی می کنند عبارتند از [۱۹-۲۰]:

(A) استراتژی LADRC مرتبه اول،

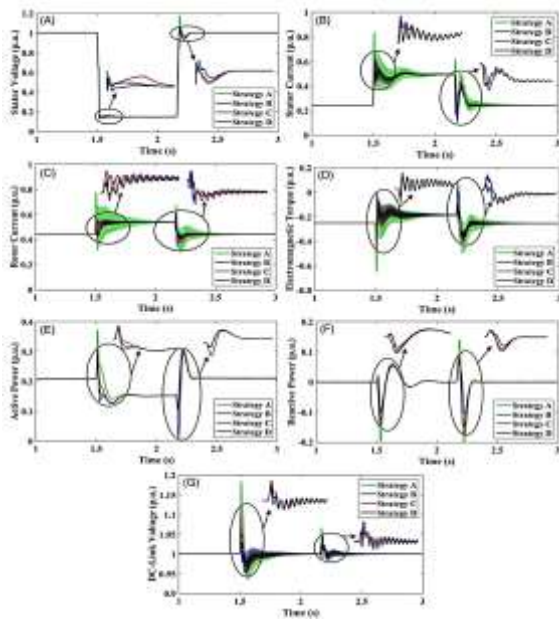
سیم پیچی شده و یک مبدل PWM<sup>۸</sup> مبتنی بر AC/DC/AC-IGBT با فرکانس سوئیچینگ ۱۶۲۰ هرتز تشکیل شده است. سیم پیچ استاتور مستقیماً به شبکه ۶۰ هرتز متصل می شود در حالی که روتور با فرکانس متغیر از طریق مبدل AC/DC/AC تغذیه می شود. مطالعه شبیه سازی بر روی سیستم نشان داده شده در شکل (۴) انجام شده است. فقط مدل های MA-NADRC و NADRC با استفاده از S-function ایجاد می شوند، در حالی که سایر بخش های مدل شبیه سازی شده از کتابخانه داخلی Simulink ایجاد شده اند. برای همه شبیه سازی ها، کنترل کننده MA-NADRC برای RSC اعمال می شود تا جریان روتور DF-IGT را برای به حداقل رساندن تلفات کلی و بهبود عملکرد دینامیکی تنظیم کند. در همین حال، GSC با استفاده از کنترل کننده PI معمولی کنترل می شود.

### ۳-۱- قابلیت ردیابی مرجع

به منظور بررسی عملکرد ردیابی مرجع در MA-NADRC پیشنهادی در طول عملیات عادی، ابتدا یک تغییر پله ای از ۰/۲ به ۰/۵۵ p.u. در زمان ۳ ثانیه به مرجع جریان محور d روتور اعمال می شود. در حالی که، مقدار فرمان جریان روتور محور q تحت یک تغییر پله ای از ۰/۲۵ pu به ۰/۳ pu قرار می گیرد تا کنترل توان راکتیو تطبیقی را برای پشتیبانی از الزامات شبکه فراهم کند.

از شکل (۴) می توان مشاهده کرد که جریان های روتور هیچ فرا جهشی وجود ندارد. علاوه بر این، عملکرد MA-NESO پیشنهادی همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، ارزیابی شده است. از شکل های (۵) (الف) و (ب) می توان مشاهده کرد که جریان های واقعی روتور و برآوردهای آن ها با یکدیگر مطابقت دارند. در همین حال، خطاهای برآورد جریان محورهای d و q روتور برابر با صفر است که در شکل (۵) (ج) نشان داده شده است. اختلالات تعمیم یافته جریان روتور و تخمین آن ها در شکل های (۵) (د) و (ه) نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که اغتشاشات واقعی با موفقیت توسط کنترل کننده پیشنهادی MA-NESO تخمین زده می شوند. می توان نتیجه گرفت که در طول عملیات عادی، ردیابی مرجع قوی و رد اختلال را می توان با استفاده از MA-NADRC پیشنهادی برای کنترل جریان های روتور DF-IGT تضمین کرد.

<sup>۸</sup>- Pulse Width modulation



شکل (۶). بین پاسخ‌های گذرا استراتژی‌های مختلف کنترل ADRC در سرعت باد کم در طول یک افت ولتاژ متعادل: (الف) ولتاژ استاتور، (ب) جریان استاتور، (ج) جریان روتور، (د) گشتاور الکترومغناطیسی، (ه) توان اکتیو، (و) توان راکتیو (pu)، (ز) ولتاژ لینک dc.

رفتارهای گذرای DF-IG-WT در یک سرعت باد زیاد ( $m/s$ ) ۱۵ با استراتژی‌های ذکر شده ADRC مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج در شکل (۷) نشان داده شده است. شرایط خطا در شکل (۷) (الف) مشابه با سرعت کم باد نشان داده شده است. استراتژی (A) هنوز بدترین پاسخ گذرا را در طول افت ولتاژ در مقایسه با سایر استراتژی‌های ADRC دارد. بنابراین، با مقایسه استراتژی‌های ADRC باقی‌مانده، می‌توان از شکل‌های (۷) (ب) و (ج) مشاهده کرد که مقادیر حداکثر دامنه جریان‌های استاتور و روتور در استراتژی (D) در مقایسه با استراتژی‌های (B) و (C) کاهش می‌یابد، به‌ویژه در شروع خطا. در همین حال، نوسانات مربوطه به سرعت با استراتژی پیشنهادی (D) میرا می‌شوند. شایان ذکر است که یک فرا جهش بزرگ در جریان روتور با استراتژی (B) در بازیابی ولتاژ القاء می‌شود. علاوه بر این، بزرگی نوسان گشتاور الکترومغناطیسی با استراتژی (D) در مقایسه با استراتژی‌های (B) و (C) همان‌طور که در شکل (۷) (د) نشان داده شده است، به‌طور قابل توجهی سرکوب شده و همچنین به سرعت تحلیل می‌رود.

همچنین، مقدار حداکثر دامنه بالای گشتاور الکترومغناطیسی توسط استراتژی (B) ایجاد می‌شود، حتی از مقدار حداکثر دامنه استراتژی (A) بیشتر است. مقادیر حداکثر دامنه توان های اکتیو و راکتیو با استراتژی‌های

(B) استراتژی NADRC مرتبه دوم،

(C) استراتژی NADRC مرتبه اول بدون NTD،

(D) استراتژی MA-NADRC پیشنهادی با  $L_m$  اشباع‌شده.

در سرعت باد کم  $8 m/s$ ، رفتارهای گذرا DF-IG-WT با استراتژی‌های ADRC ذکر شده در طول یک افت ولتاژ شبکه مورد مطالعه قرار گرفته و در شکل (۶) نشان داده شده است. در ابتدا، از شکل (۶) (الف) مشاهده می‌شود که خطا در  $1/5$  ثانیه رخ می‌دهد، ولتاژ استاتور به  $0.15 pu$  کاهش می‌یابد و پس از رفع خطا در  $2/15$  ثانیه به مقدار عادی خود بازمی‌گردد. از شکل (۶) مشخص است که استراتژی (A) دارای بیشترین فرا جهش و طولانی‌ترین زمان نشست برای همه متغیرهای سیستم است، همچنین نوسانات حالت پایدار آن نسبتاً زیاد است. بنابراین، این استراتژی بدترین پاسخ گذرا را در مقایسه با سایر استراتژی‌های ADRC دارد.

از شکل‌های (۶) (ب) و (ج) می‌توان مشاهده کرد که جریان‌های استاتور و روتور با هر دو استراتژی (B) و (C) عملکرد تقریباً مشابهی از نظر درصد فرا جهش و مقدار زمان نشست دارند. باین‌حال، در برخی شرایط، استراتژی (C) عملکرد بهتری نسبت به استراتژی (B) دارد و بالعکس. به‌عنوان مثال، بزرگی نوسان جریان روتور با استراتژی (B) بهتر از استراتژی (C) در لحظه شروع خطا سرکوب می‌شود، درحالی‌که عکس آن در لحظه رفع خطا صادق است. از سوی دیگر، عملکرد گذرای بهتر جریان‌های استاتور و روتور با استراتژی پیشنهادی (D) را می‌توان در مقایسه با استراتژی‌های (B) و (C) درک کرد. علاوه بر این، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی با استراتژی (D) به‌طور قابل توجهی کاهش داده شده و همچنین در مقایسه با استراتژی‌های (B) و (C) به سرعت تحلیل می‌روند که در شکل (۶) (د) نشان داده شده است. از شکل‌های (۶) (ه) و (و) می‌توان دریافت که در مرحله افت ولتاژ، مقادیر حداکثر دامنه توان های اکتیو و راکتیو با استراتژی (D) کمتر از استراتژی‌های (B) و (C) است. همچنین می‌توان اشاره کرد که درصد فرا جهش توان اکتیو با استراتژی (B) در مرحله بازیابی ولتاژ، حتی در مقایسه با استراتژی (A)، بزرگ‌ترین است. ولتاژ لینک dc برای استراتژی‌های (C) و (D) تقریباً مشابه است و همچنین هر دو آن‌ها، همان‌طور که در شکل (۶) (ز) نشان داده شده است، کمتر از استراتژی (B) هستند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مقدار حداکثر دامنه ولتاژ لینک dc با استراتژی (D) در مقایسه با استراتژی‌های دیگر بسیار کاهش می‌یابد.

جدول (۱). پاسخ‌های گذرا جریان روتور و لینک dc در سرعت ۱۵ m/s با استراتژی‌های مختلف ADRC

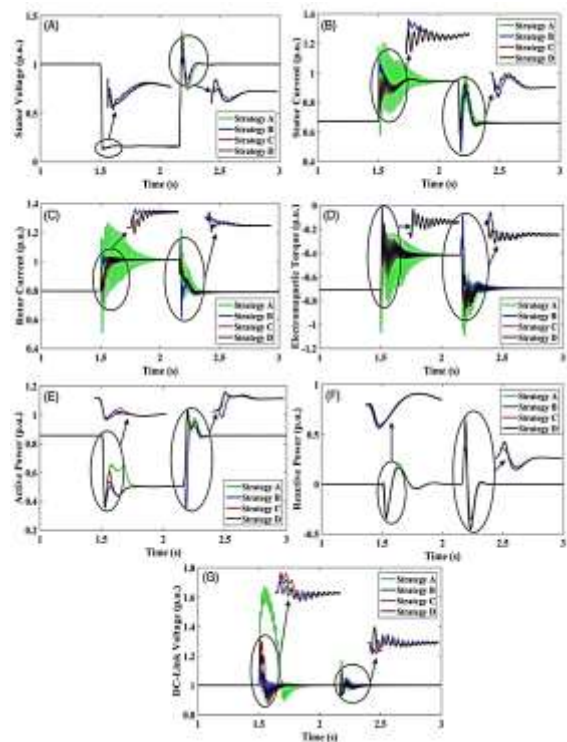
جریان روتور				
استراتژی	$t_s$ در بروز خطا	$\%O.S$ در بروز خطا	$\%O.S$ در رفع خطا	خطا
(A)	۶۱۰	۵۸/۰	۷/۵۵	۵/۲۵
(B)	۴۱۰	۳۱/۰	۶/۴۵	۷/۲
(C)	۲۳/۰	۲۹/۰	۴/۳۰	۴/۲
(D)	۲۳/۰	۲۳/۰	۴/۳۰	۹/۱
ولتاژ لینک dc				
استراتژی	$t_s$ در بروز خطا	$\%O.S$ در بروز خطا	$\%O.S$ در رفع خطا	خطا
(A)	۶۲/۰	۲۵/۰	۶۷	۱۷
(B)	۵۶/۰	۴۳/۰	۱۸/۷	۴/۵
(C)	۴/۰	۲۴/۰	۳۲	۴/۱۰
(D)	۴/۰	۲۳/۰	۲۷	۳/۱۰

علاوه بر این، عملکرد کنترلی MA-NADRC پیشنهادی با خطای متعادل و نامتعادل با کنترل‌کننده PI معمولی در سرعت باد کم و بالا مقایسه شده است. یک افت ولتاژ متعادل با شرایط مشابه قسمت قبل به شبکه اعمال می‌شود، درحالی‌که یک افت ولتاژ نامتعادل ۰/۵ p.u. به دلیل خطای خط به خط در PCC اعمال می‌شود و ۶۲۵ میلی‌ثانیه طول می‌کشد. پارامترهای کنترل‌کننده PI با استفاده از روش Ziegler-Nichols (Z-N) تنظیم شده و نتایج با آزمون سعی و خطا مقایسه شده است. در سرعت باد کم ۸ m/s، رفتارهای گذرا جریان روتور و ولتاژ لینک dc مجهز به MA-NADRC پیشنهادی و کنترل‌کننده PI سنتی ارائه و مقایسه می‌شوند. این مقایسه در هنگام افت ولتاژ متعادل و نامتعادل شبکه انجام می‌شود که در شکل (۸) نشان داده شد.

از شکل (۸) (الف)، می‌توان دید که نوسانات جریان روتور با استراتژی پیشنهادی MA-NADRC در مقایسه با کنترل‌کننده PI کلاسیک که با آزمون سعی و خطا تنظیم می‌شود، به‌طور قابل‌توجهی سرکوب‌شده و همچنین به‌سرعت از بین می‌رود. همچنین، مقادیر حداکثر دامنه ولتاژ لینک dc با استراتژی پیشنهادی که در شکل (۸) (ب) نشان داده شده است، تا حد زیادی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، شکل (۹) (ج) و (د) مقایسه‌ای بین MA-NADRC پیشنهادی و کنترل‌کننده PI که پارامترهای آن با روش Z-N تنظیم شده است، ارائه می‌کند. علی‌رغم اینکه رفتار دینامیکی کنترل‌کننده PI هنگامی‌که با روش Z-N تنظیم می‌شود، بهبود می‌یابد، پاسخ دینامیکی MA-NADRC پیشنهادی همان‌طور که در شکل‌های (۸) (ج) و (د) نشان داده شده است، همچنان بهترین است. در حالت افت ولتاژ نامتعادل، جریان روتور با روش پیشنهادی MA-NADRC، همان‌طور که در شکل (۹) (الف) مشاهده می‌شود، خیلی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. با این حال، جریان روتور با نوسانات قوی در اطراف آن و فرا جهش بزرگ در هنگام استفاده از کنترلر PI، مقدار بالایی جدیدی به

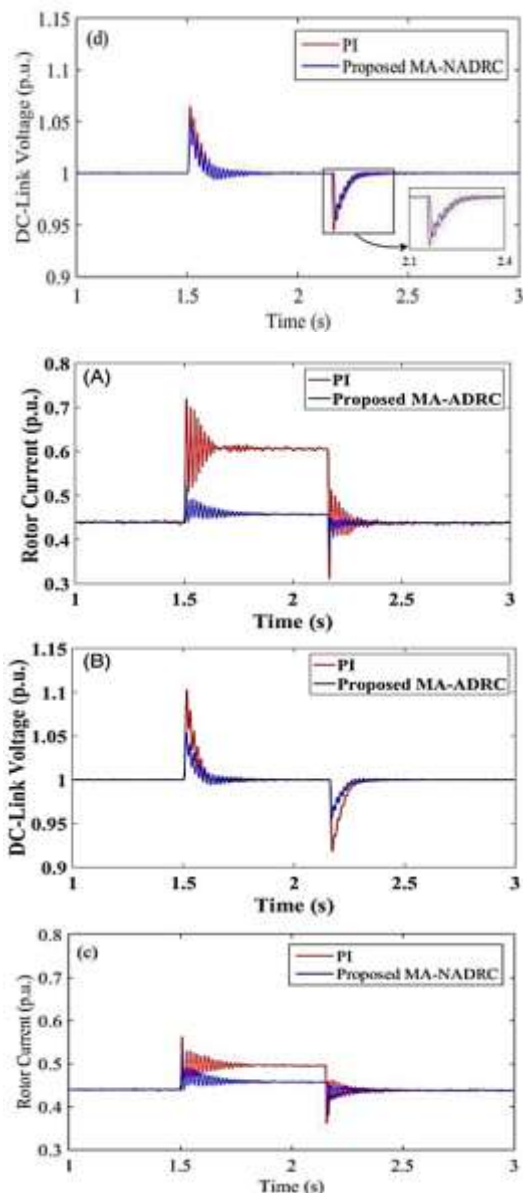
(C) و (D) تقریباً یکسان است. با این حال، درصد فرا جهش توان اکتیو با استراتژی (B) در بازیابی ولتاژ در مقایسه با سایر استراتژی‌های ADRC، بزرگ‌ترین است.

به‌طور کلی، مانند سرعت باد کم، مقدار نسبتاً پایداری از هر دو توان اکتیو و راکتیو با استراتژی (D) به دست می‌آید. با این حال، مقدار حداکثر دامنه ولتاژ لینک dc با استراتژی (B) در مقایسه با استراتژی پیشنهادی (D) نسبتاً کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۷) (ز) نشان داده شده است، با استراتژی (D)، نوسان سریع‌تر از بین می‌رود. بدون شک، حتی اگر استراتژی (B) بتواند عملکرد بهتری در چنین حالتی ارائه دهد، تنظیم پارامترهای این روش نسبت به استراتژی پیشنهادی (D) دشوارتر است. همچنین باید توجه داشت با استراتژی (A) ولتاژ لینک dc از مقدار حدی خود (یعنی ۱.۵ p.u.) فراتر می‌رود. بنابراین، می‌تواند منجر به فعال شدن دستگاه‌های حفاظتی و قطع DF-IG-WT ها از شبکه شود. درصد فرا جهش (OS) و زمان نشست ( $t_s$ ) جریان روتور و ولتاژ لینک dc با چهار استراتژی ADRC در سرعت ۱۵ m/s در جدول (۱) مقایسه شده‌اند.



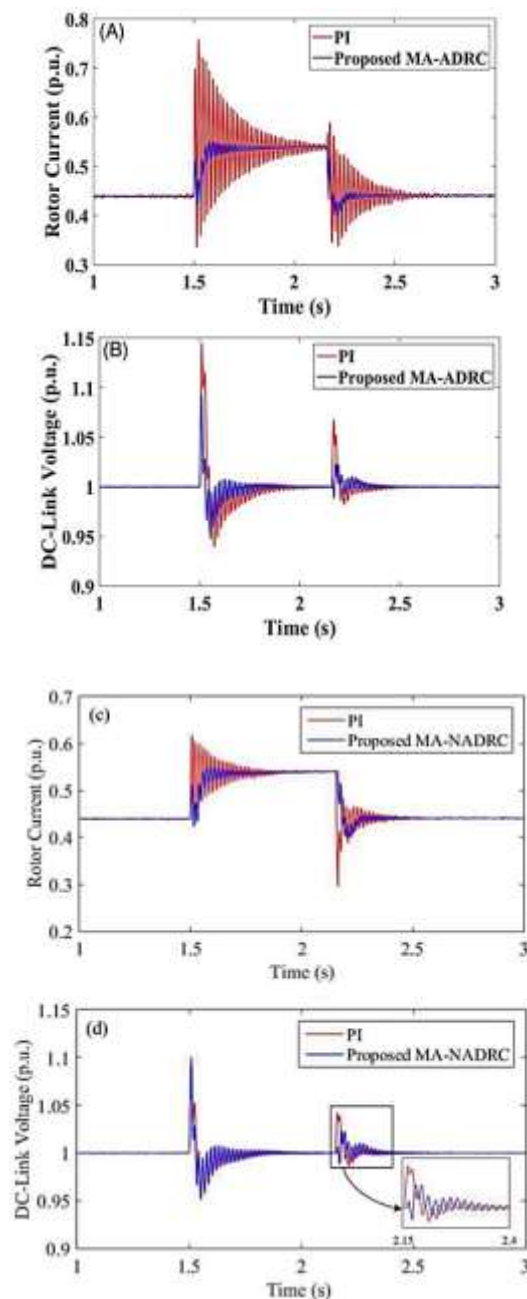
شکل (۷). مقایسه بین پاسخ‌های گذرا استراتژی‌های مختلف کنترل ADRC در سرعت باد بالا در طول یک افت ولتاژ متعادل: (الف) ولتاژ استاتور، (ب) جریان استاتور، (ج) جریان روتور، (د) گشتاور الکترومغناطیسی، (ه) توان اکتیو، (و) توان راکتیو، (ز) ولتاژ لینک dc.

از شکل‌های (۹) الف) و (ج) مشهود است که مقدار حداکثر دامنه جریان روتور DFIG از  $0.72 \text{ pu}$  به  $0.57 \text{ pu}$  کاهش یافته است، همچنین مقدار جدید جریان روتور با روش Z-N به  $0.5 \text{ pu}$  کاهش می‌یابد، درحالی‌که هنگامی‌که یک آزمون سعی و خطا اعمال می‌شود،  $0.6 \text{ pu}$  بود. همچنین، از شکل‌های (۹) ب) و (د) واضح است که وقتی روش Z-N برای محاسبه بهره کنترل کننده PI اعمال می‌شود، مقدار حداکثر دامنه ولتاژ لینک dc از تقریباً  $1.1 \text{ pu}$  به  $1.07 \text{ pu}$  کاهش می‌یابد. قابل توجه، رفتار دینامیکی MA-NADRC پیشنهادی نسبت به کنترل کننده PI به طور کلی عملکرد بهتری دارد.



شکل (۹). مقایسه بین پاسخ‌های گذرای کنترل کننده PI معمولی و MA-NADRC پیشنهادی در سرعت باد کم در طول یک افت ولتاژ نامتعادل: (الف)

خود می‌گیرد. از شکل (۹) ب)، واضح است که مقادیر حداکثر دامنه ولتاژ لینک dc با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده PI کاهش می‌یابد. علاوه بر این، شکل (۹) ج) و (د) مقایسه‌ای بین MA-NADRC پیشنهادی و کنترل کننده PI ارائه می‌دهد که پارامترهای آن با روش Z-N تنظیم شده‌اند.



شکل (۸). مقایسه بین پاسخ‌های گذرا کنترل کننده PI معمولی و MA-NADRC پیشنهادی در سرعت باد کم در طول یک افت ولتاژ متعادل: (الف) جریان روتور (تنظیم بهره‌های PI با روش سعی و خطا)، (ب) ولتاژ لینک dc (تنظیم بهره‌های PI با روش سعی و خطا)، (ج) جریان روتور (pu) (تنظیم بهره‌های PI به روش Z-N)، (د) ولتاژ لینک dc (تنظیم بهره‌های PI به روش Z-N)

- [۴]. Chakraborty and T. Maity, "Integrated control algorithm for fast and accurate detection of the voltage sag with low voltage ride-through (LVRT) enhancement for doubly-fed induction generator (DFIG) based wind turbines," *Control Engineering Practice*, vol. ۱۳۱, p. ۱۰۵۳۹۳, ۲۰۲۳.
- [۵]. H. Jin, Z. Zhou, and P. Qu, "Three-vector model predictive power control of doubly fed induction generator based on linear extended state observer under unbalanced grid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. ۱۶۱, p. ۱۱۰۱۶۸, ۲۰۲۴.
- [۶]. G.N. González, C.H. De Angelo, and D.A. Aligia, "A control strategy for DFIG-based systems operating under unbalanced grid voltage conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. ۱۴۶, p. ۱۰۸۲۷۳, ۲۰۲۲.
- [۷]. A.M. Eltamaly, M.S. Al-Saud, and A.G. Abo-Khalil, "Dynamic control of a DFIG wind power generation system to mitigate unbalanced grid voltage," *IEEE Access*, vol. ۸, pp. ۳۹۰۹۱-۳۹۱۰۳, ۲۰۲۰.
- [۸]. A.G. Abo-Khalil, W. Alharbi, A.R. Al-Qawasmī, M. Alobaid, and I. Alarifi, "Modeling and control of unbalanced and distorted grid voltage of grid-connected DFIG wind turbine," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. ۳۱, no. ۵, p. e۱۲۸۵۷, ۲۰۲۱.
- [۹]. S. Das and B. Singh, "Enhanced control of DFIG based wind energy conversion system under unbalanced grid voltages using mixed generalized integrator," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. ۳, no. ۲, pp. ۳۰۸-۳۲۰, ۲۰۲۲.
- [۱۰]. S. Hu, G. Zhu, and Y. Kang, "Modeling and coordinated control design for brushless doubly-fed induction generator-based wind turbine to withstand grid voltage unbalance," *IEEE Access*, vol. ۹, pp. ۶۳۳۳-۶۳۳۴۴, ۲۰۲۱.
- [۱۱]. X. Kong, X. Wang, M.A. Abdelbaky, X. Liu, and K.Y. Lee, "Nonlinear MPC for DFIG-based wind power generation under unbalanced grid conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. ۱۳۴, p. ۱۰۷۴۱۶, ۲۰۲۲.
- [۱۲]. S. Hu and G. Zhu, "Enhanced control and operation for brushless doubly-fed induction generator-based wind turbine system under grid voltage unbalance," *Electric Power Systems Research*, vol. ۲۰۷, p. ۱۰۷۸۶۱, ۲۰۲۲.
- [۱۳]. Sobhy, A.G. Abo-Khalil, D. Lei, T. Salameh, A. Merabet, and M. Alkasrawi, "Coupling DFIG-based wind turbines with the grid under voltage imbalance conditions," *Sustainability*, vol. ۱۴, no. ۹, p. ۵۰۷۶, ۲۰۲۲.
- [۱۴]. Abedi, Alireza and Sepasian, Mohammad Sadeq and Talebpour, Mohsen and Hagiri, Abdolali, ۲۰۱۵, Presenting a new model for wind speed to assess the adequacy of wind turbine generation at defense sites,
- [۱۵]. J. Zheng, B. Li, Q. Chen, Y. Zhang, and Y. Liu, "HPF-LADRC for DFIG-based wind farm to mitigate subsynchronous control interaction," *Electric Power Systems Research*, vol. ۲۱۴, p. ۱۰۸۹۲۵, ۲۰۲۳.

جریان روتور (تنظیم بهره‌های PI با روش سعی و خطا)، (ب) ولتاژ لینک dc (تنظیم بهره‌های PI با روش سعی و خطا)، (ج) جریان روتور (تنظیم بهره‌های PI به روش Z-N)، (د) ولتاژ لینک dc (تنظیم بهره‌های PI به روش Z-N)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش نوآورانه کنترل مبتنی بر MA-NADRC همراه با فن LM برای تنظیم جریان روتور در ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) تحت شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه پیشنهاد شده است. روش LM به منظور استخراج تحلیلی مقدار بهینه جریان راکتیو DFIG به کار گرفته شد تا تلفات کلی را به حداقل برساند. MA-NADRC با معرفی اطلاعات مدل روتور به بخش کمکی مدل طراحی شده و تغییر اندوکتانس مغناطیسی نیز در این روش مدنظر قرار گرفت. این رویکرد امکان تحویل توان بیشتر به شبکه و افزایش قابلیت کاهش اختلالات را فراهم کرده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این روش توانسته است تلفات کلی سیستم را به حداقل رسانده و توان تحویلی به شبکه را بهبود بخشد. به‌ویژه، در شرایط افت ولتاژ متعادل ۰/۱۵ پریونیت، کنترل MA-NADRC زمان نشست ۰/۱۲ ثانیه و فرا جهش ۱/۵٪ را برای جریان روتور ثبت کرد، درحالی‌که روش‌های NADRC و LADRC عملکرد ضعیف‌تری با زمان نشست و فرا جهش بیشتر داشتند. همچنین، در سرعت باد بالا (۱۵ متر بر ثانیه)، MA-NADRC عملکرد بهتری با فرا جهش ۲/۱٪ و زمان نشست ۰/۱۵ ثانیه نشان داد. درنهایت، این روش در کاهش نوسانات و بهبود پایداری سیستم در شرایط مختلف عملیاتی موفق عمل کرده است. این نتایج حاکی از کارایی بالای MA-NADRC در بهبود پایداری و عملکرد سامانه‌های DFIG در مواجهه با اختلالات و نوسانات ولتاژ شبکه است.

#### ۵- مراجع

- [۱]. A.B. Patel and R. Chilipi, "Development of constant switching frequency model predictive control for DFIG-based wind energy conversion system in standalone and grid connected operation," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. ۶۴, p. ۱۰۳۷۳۹, ۲۰۲۴.
- [۲]. E.G. Shehata, "Improved power control of DFIGs driven by wind turbine under unbalanced grid voltage," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. ۱۹, no. ۱, pp. ۳۲۵-۳۴۰, ۲۰۲۴.
- [۳]. M. Cheng, Z. Cao, and X. Yan, "Dual-negative-objective coordinated control of brushless doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, ۲۰۲۴.

- Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Jan. ۲۰۲۲, pp. ۸۷۶-۸۸۱.
- [۱۹]. Chen, D. Zhang, J. Cao, Y. Zhong, J. Huang, and Y. Zhang, "Mitigation of subsynchronous control interaction in DFIG-based wind farm using SDC-LADRC," in Proc. ۲۰۲۴ CPSS & IEEE Int. Symp. Energy Storage and Conversion (ISESC), Nov. ۲۰۲۴, pp. ۱۰۶۱-۱۰۶۵.
- [۲۰]. S. Gao, C. Mao, D. Wang, and J. Lu, "Dynamic performance improvement of DFIG-based WT using NADRC current regulators," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. ۸۲, pp. ۳۶۳-۳۷۲, ۲۰۱۶.
- [۱۶]. H. Jin, Z. Zhou, and P. Qu, "Three-vector model predictive power control of doubly fed induction generator based on linear extended state observer under unbalanced grid," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. ۱۶۱, p. ۱۱۰۱۶۸, ۲۰۲۴.
- [۱۷]. Saadi, Sajjad and Kamyab, Mohammad Hassan, ۲۰۱۳, Simulation and improvement of wind turbine power by applying boundary layer suction method on blades,
- [۱۸]. Sobhy, D. Lei, and A. G. Abo-Khalil, "Enhancing the performance of the output active power of DFIG-based wind turbines using auto disturbance rejection control," in Proc. ۲۰۲۲