



## کنترل نیروگاه بادی از دو سو تغذیه متصل به شبکه با روش کنترل برداری

عبدالمجید حسنی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>عضو هیات علمی جهاد دانشگاهی خوزستان (ACECR)

Email: hasani@acecr.ac.ir

### چکیده

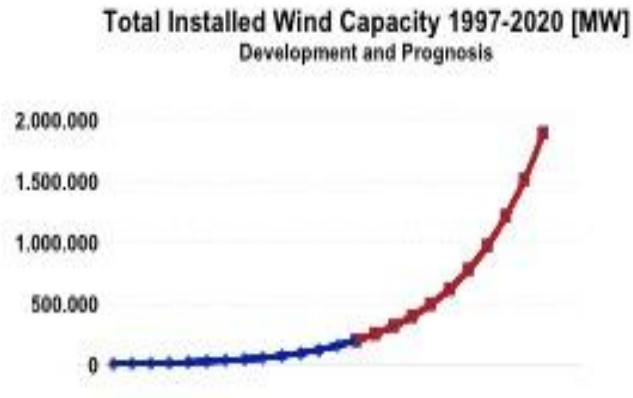
در این مقاله نیروگاه بادی DFIG متصل به شبکه سراسری فرض شده است. با تغییر سرعت باد سرعت روتور DFIG نیز تغییر می‌کند، لذا با روش VC مبدل سمت روتور را آنچنان کنترل می‌کنیم که توان اکتیو و توان راکتیو DFIG به خوبی کنترل شود. این کنترل از طریق اعمال ولتاژ مناسب به روتور توسط RSC است. نتایج شبیه سازی عملکرد صحیح کنترل را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)، کنترل برداری (VC)، مبدل سمت روتور (RSC)

### ۱. مقدمه

با گسترش روز افزون جوامع بشری و توسعه صنعتی جوامع مختلف، نیاز به منابع انرژی، در حال افزایش است. از سویی دیگر منابع فسیلی در جهان رو به اتمام است. این منابع، از نظر اندازه و مقدار، محدود بوده و در ضمن، آلاینده محیط زیست نیز محسوب می‌شوند. از این رو در سال‌های اخیر، گرایش به استفاده از منابع نوین و تجدیدپذیر انرژی، رو به فزونی است. یکی از ارزانه‌ترین و در دسترس‌ترین منابع تجدیدپذیر انرژی، انرژی باد است. بررسی میزان استفاده این انرژی در سال‌های اخیر به خوبی گویای اهمیت و جایگاه آن در تامین انرژی در سطح جهان است. استفاده از انرژی بادی برای تولید انرژی الکتریکی دارای مزایای زیر است:

- ۱- ارزان بودن
  - ۲- سوخت رایگان
  - ۳- دسترسی فراگیر به منبع تولید یعنی باد
  - ۴- افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و توجیه اقتصادی میان مدت
  - ۵- پاک بودن و زیان کمتر آنها برای محیط زیست
  - ۶- توجه به تنوع در سبد تولید انرژی
- شکل (۱) رشد نیروگاه بادی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): رشد ظرفیت نیروگاه بادی نصب شده در جهان

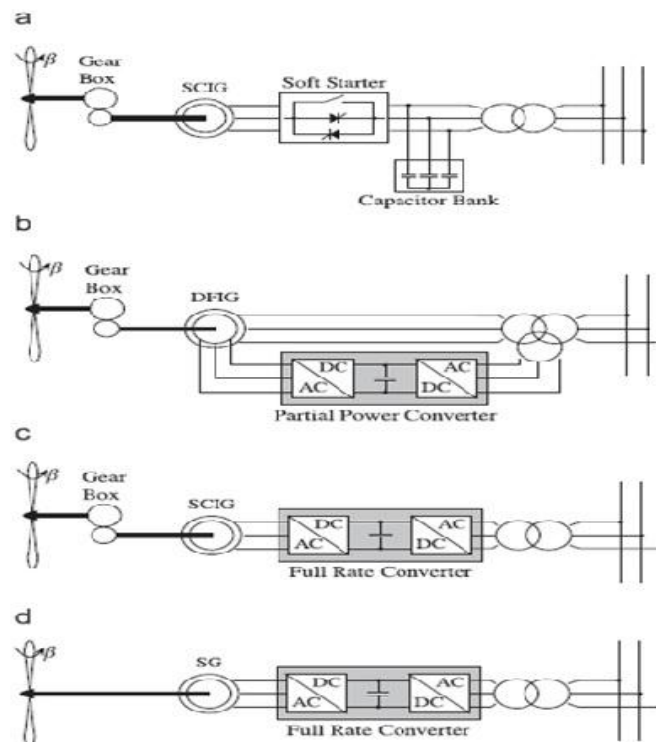
یکی از مهمترین قسمت‌ها در سیستم‌های انرژی بادی، ژنراتور آن‌هاست. انواع ژنراتور در توربین بادی عبارتست از:

ژنراتور القایی معمولی (SCIG)

ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده<sup>۱</sup> (DFIG)

ژنراتور سنکرون با تحریک روی روتور (EESG)

ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم<sup>۲</sup> (PMSG)



شکل (۲): a: ژنراتور القایی روتور قفسی (سرعت ثابت) b: ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده (سرعت متغیر) c: ژنراتور القایی قفس

سنجایی با مبدل فرکانسی کامل (سرعت متغیر) d: ژنراتور سنکرون با مبدل کامل بدون جعبه دنده (سرعت متغیر)

<sup>1</sup> Doubly Fed Induction Generator

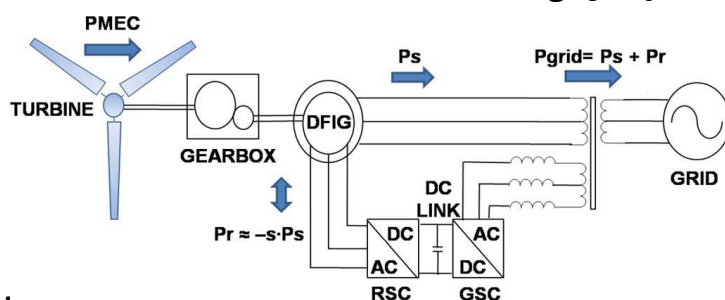
<sup>2</sup> Permanent Magnet Synchronous Generator

## ۲. ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده ( DFIG )

یکی از انواع رایج ژنراتورها در توربین های بادی سرعت متغیر، ژنراتور DFIG است. استاتور این ژنراتور به طور مستقیم و روتور آن از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل می شود. شکل (۳)، DFIG در سیستمهای بادی را نشان می دهد. به دلیل وجود مبدل ها در روتور، این ژنراتور قابلیت عملکرد بالایی دارد و قادر است در سرعت های بالا و پایین سنکرون عمل نماید. سیم پیچ استاتور در دو حالت فوق به شبکه توان اکتیو تحویل می دهد در حالی که روتور در شرایط زیر سنکرون از شبکه توان گرفته و در شرایط فوق سنکرون به شبکه توان اکتیو تحویل می دهد. توان تحویلی ژنراتور به شبکه برابر مجموع توان های استاتور و روتور می باشد.

حضور مبدل پشت به پشت در DFIG این امکان را به وجود می آورد که در شرایط مختلف اغتشاشات حاصل از شبکه، سیستم بتواند با عملکردهای کنترلی مناسب پایدار باقی بماند.

از دیگر مزیت های این طرح این است که کانورترهای استفاده شده تنها بخشی از توان نامی ژنراتور توربین بادی را حمل می کنند که معمولاً مقدار آن حدود ۳۰٪ توان نامی ژنراتور است. این مطلب در حالیست که کانورترهای استفاده شده برای ژنراتورهای القایی معمولی و یا ژنراتورهای سنکرون بایستی قدرت تحمل کل توان ژنراتور را داشته باشند. شکل زیر حالت استاندارد DFIG متصل به شبکه را نشان می دهد.



شکل (۳): DFIG متصل به شبکه

همانطور که میدانیم سه روش کنترلی برای DFIG وجود دارد: VC, DTC, DPC که مزایای روش کنترل برداری را می توان به شرح زیر بیان کرد [۴]:

تکیه روش VC بر مقادیر متوسط گیری سیگنال های اندازه گیری می باشد لذا نویز اندازه گیری، فیلتر و حذف می شود (بر خلاف روش DTC و DPC).

پایین بودن میزان هارمونیک

پایین بودن محدودیت های زمان نمونه برداری

پایین بودن محدودیت های اندازه گیری

مقاوم بودن در برابر نامعینی مدل

مناسب بودن جهت MPPT

دقت زیاد، فرکانس کلید زنی ثابت و عملکرد خوب در حالت ماندگار

## ۳. مدل ژنراتور DFIG

DFIG دو سیم پیچی سه فاز (روتور و استاتور) دارد که دارای اندوکتانس خودالقایی و اندوکتانس القای متقابل هستند. با چرخش ماشین، اندوکتانس متقابل و زاویه بین روتور و استاتور تغییر میکند؛ لذا به یک مدل ریاضی متغیر با زمان می رسیم. برای کاهش پیچیدگی معادلات مربوط به مدل ماشین و همچنین وابستگی مدل به این زاویه دو تبدیل انجام میشود: (۱)

تبدیل کلارک که مولفه های سه فاز abc را به مولفه های alphabet (در چارچوب مرجع ایستا) تبدیل می کند. (۲) تبدیل پارک که مولفه های alphabet را به مولفه های dq در چارچوب مرجع استاتور تبدیل می کند. معادلات dq مربوط به DFIG در چارچوب مرجع استاتور به شرح زیر است [۱]:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + s \lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (1)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + s \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (2)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + s \lambda'_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{dr} \quad (3)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + s \lambda'_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{qr} \quad (4)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M i'_{qr}; \quad \lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_M i'_{dr} \quad (5)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_M i_{qs}; \quad \lambda'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_M i_{ds} \quad (6)$$

گشتاور الکترومغناطیسی را می توان به صورت (۷) بیان کرد:

$$T_e = \frac{3}{2} P_p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (7)$$

که در معادلات (۱-۶) داریم:

$$L_s = L_{ls} + L_M; \quad L'_r = L'_{lr} + L_M; \quad L_M = \frac{3L_{ms}}{2} \quad (8)$$

#### ۴. اصول کنترل برداری

در DFIG متصل به شبکه سراسری با صرف نظر از مقاومت استاتور و با فرض ولتاژ متعادل در شبکه، شار استاتور را می توان ثابت در نظر گرفت. رابطه شار استاتور با ولتاژ شبکه، به صورت معادله (۹) است:

$$\lambda_{\alpha\beta s} = \int (v_{\alpha\beta s} - R_s i_{\alpha\beta s}) dt \quad (9)$$

با هم راستا کردن بردار شار استاتور  $\lambda_s$  در جهت محور d مربوط به چارچوب مرجع گردان dq می توان معادلات (۱-۴) را ساده کرد:

$$\lambda_s = |\lambda_{\alpha\beta}| \text{angle}(\lambda_{\alpha\beta})$$

$$\text{angle}(\lambda_{\alpha\beta}) = \tan^{-1}(\lambda_{\alpha}/\lambda_{\beta}); \quad |\lambda_{\alpha\beta}| = \sqrt{\lambda_{\alpha}^2 + \lambda_{\beta}^2} \quad (10)$$

لذا مدل DFIG را می توان به صورت معادلات (۱۱-۱۴) ساده کرد:

$$v_{qs} = \omega_e \lambda_{ds} = v_s \quad (11)$$

$$v_{ds} = 0 \quad (12)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \sigma L'_r s i'_{qr} + \omega_{slip} \left( \frac{L_M^2}{L_s} I_{ms} + \sigma L'_r i'_{dr} \right) \quad (13)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \sigma L'_r s i'_{dr} - \omega_{slip} \sigma L'_r i'_{qr} \quad (14)$$

که داریم:

$$\lambda_{ds} = \lambda_s \approx L_M I_{ms}; \lambda'_{qr} = \sigma L'_r i'_{qr} \quad (15)$$

$$\lambda'_{dr} = L_M^2 I_{ms} / L_s + \sigma L'_r i'_{dr}; I_{ms} = \lambda_{ds} / L_M \quad (16)$$

$$\sigma = 1 - L_M^2 / (L_s L'_r) \quad (17)$$

با حل دو معادله (۱۳-۱۴) می‌توانیم به معادلات حالت زیر دست یابیم:

$$i'_{qr} = -\frac{R'_r}{\sigma L'_r} i'_{qr} + \frac{1}{\sigma L'_r} v'_{qr} - \omega_s i'_{dr} + v'_q \quad (18)$$

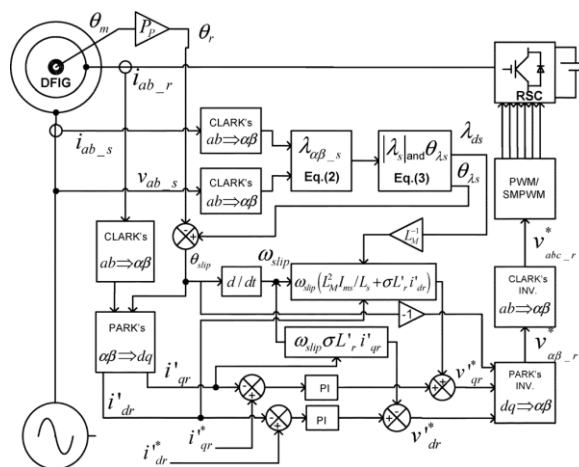
$$i'_{dr} = -\frac{R'_r}{\sigma L'_r} i'_{dr} + \frac{1}{\sigma L'_r} v'_{dr} + \omega_s i'_{qr} \quad (19)$$

که در معادلات فوق داریم:

$$v'_q = \frac{\omega_s L_M^2 I_{ms}}{\sigma L'_r L_s} \quad (20)$$

## ۵. کاربرد VC در DFIG

شکل (۴) کاربرد VC را نشان می‌دهد. ابتدا جریان‌های روتور ( $i_{abc,r}$ ) اندازه‌گیری می‌شوند سپس به چارچوب مرجع dq تبدیل شده‌اند. نگاه از جریانه‌های مرجع کسر می‌شوند تا سیگنال‌های خطا را تولید کنند. این سیگنال‌های خطا به دو کنترلر PI وارد می‌شوند.



شکل (۴): کاربرد VC در مورد DFIG

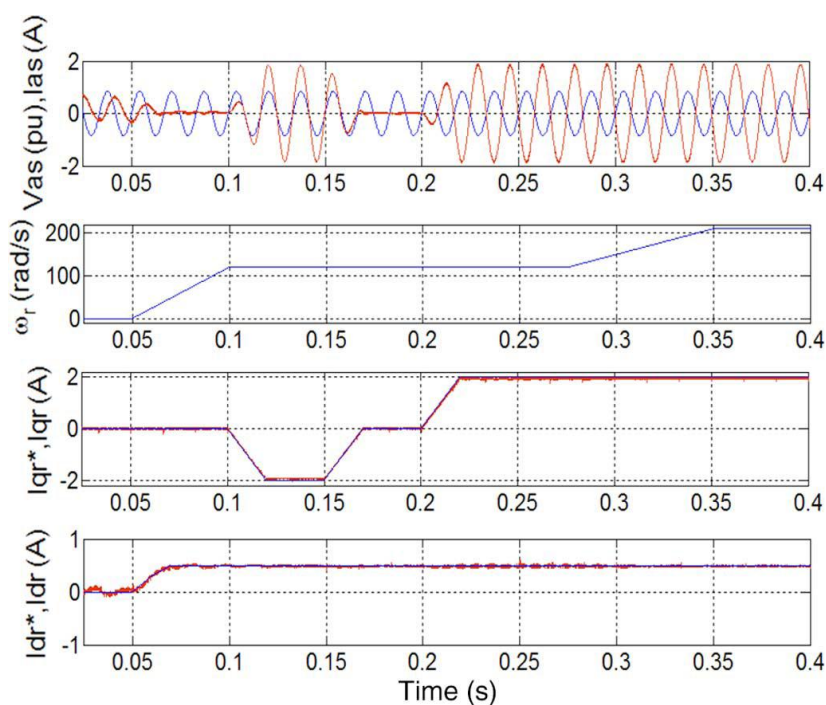
دو جریان مرجع  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  را می‌توان به ترتیب به گشتاور الکتریکی و ضریب توان ترمینال استاتور ارجاع داد. از معادله (۱۱) با فرض ضریب توان واحد ( $i_{ds}=0$ ) به معادله (۲۱) و از معادلات (۵) و (۷) به معادله (۲۲) دست می‌باییم:

$$i_{dr}^* = v_{qs}/(\omega_e L_M) \quad (21)$$

$$i_{qr}^* = -2T_e L_s / (3P_p L_M^2 i_{dr}^*) \quad (22)$$

## ۶. نتایج شبیه سازی کنترل برداری DFIG

نتایج شبیه سازی از نرم افزار Simulink مربوط به متلب و محیط شبیه سازی آن بدست می‌آیند. شکل (۵) نتایج شبیه سازی روش VC را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نتایج شبیه سازی روش VC

سرعت ماشین طبق شرح زیر از ۵ تا ۲۱۰ رادیان بر ثانیه تغییر کرده است. در فاصله زمانی  $0 < t < 0.05$ ؛ ماشین دارای سرعت صفر بوده و توان راکتیو مصرف می‌شود. در فاصله زمانی  $0.05 < t < 0.1$ ؛ سرعت ماشین بالا رفته، جریان مرجع  $i_{dr}^*$  یک STEP بالا رفته و ماشین، توان راکتیو خود را تأمین می‌کند و از این نقطه ضریب توان یک، ثابت نگه داشته می‌شود. در فاصله زمانی  $0.1 < t < 0.15$ ؛ یک STEP منفی به  $i_{qr}^*$  اعمال شده و باعث می‌شود ماشین به حالت موتوری برود. در فاصله زمانی  $0.15 < t < 0.2$ ؛ روی  $i_{qr}^*$  صفر تنظیم می‌شود. در فاصله زمانی  $0.2 < t < 0.4$ ؛ یک STEP مثبت به  $i_{qr}^*$  اعمال شده و باعث می‌شود ماشین به حالت ژنراتوری برود.

## ۷. نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند روش VC به خوبی DFIG را کنترل می‌کند زیرا جریان‌های روتور ناشی از ولتاژ اعمالی از مبدل RSC به خوبی جریان‌های مرجع را دنبال می‌کنند.

- [1] M. Chomat, J. Bendl, and L. Schreier, "Extended vector control of doubly fed machine under unbalanced power network conditions," in Proc. Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives, 2002, pp. 329–334.
- [2] M. Chomat, J. Bendl, and L. Schreier, "Extended vector control of doubly fed machine under unbalanced power network conditions," in Proc. Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives, 2002, pp. 329–334.
- [3] Ling Peng, "A modified vector control strategy for DFIG based wind turbines to Ride-Through voltage dips", Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on Page(s): 1 – 10.
- [4] Etienne Tremblay, Sergio Atayde, and Ambrish Chandra, Comparative Study of Control Strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems: A DSP-Based Implementation Approach, IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 2, NO. 3, JULY 2011.
- [5] Ebrahim Zarei, Mohammad & Asaei, Behzad, "Combined Vector Control and Direct Power Control Methods for DFIG under Normal and Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions", Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2013 4th.

## Control of DFIG connected to the grid using vector control

*Abdolmajid Hasani<sup>1</sup>*

*1. Production Technology Research Institute (PTRI) of Iranian Academy Center for Education , Culture and Research (ACECR) of Khuzestan, ahwaz, iran, hasani@acecr.ac.ir*

**Abstract.** In this paper is assumed the DFIG wind power plant has been connected to the grid. DFIG rotor speed also changes by changing the wind speed. The active and reactive of DFIG is controlled using VC method that the converter of the rotor is controlled. This performance is done using to apply the proper voltage to the rotor by RCS. The simulation results show the correct operation of control system.

**Keywords:** DFIG, Vector Control, Rotor Side Converter