



## مقاوم سازی درایو کنترل سرعت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به ازاء سرعت های مختلف توربین بادی از طریق جبران سازی شار روتور در روش کنترل برداری مستقیم

حجت مویدی راد ، محمدعلی شمسی نژاد و رضا ابولی

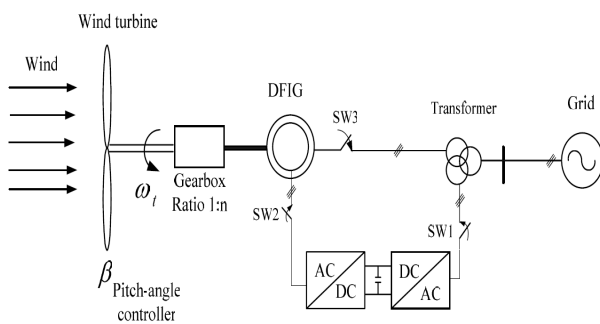
زیرا به پارامترهای موتور وابستگی کمتری دارد. این روش کنترلی وابسته به تخمین شار است. استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از جدیدترین و مهم ترین منابع تولید توان الکتریکی در بسیاری نقاط مورد توجه فراوان قرار گرفته است. متغیر بودن سرعت باد در توربین های بادی از اهمیت بالایی برخوردار است. در سیستم های کنترل سرعت، فرض بر ثابت بودن سرعت است ولی در نیروگاه- های بادی به علت ماهیت متغیر سرعت باد رفتار دینامیکی سیستم از اهمیت بالایی برخوردار می شود. متغیر بودن سرعت باد باعث تنش های مکانیکی و نوسانات توان الکتریکی می شود و همچنین باعث در اختیار گرفتن توان کمتری می شود [9]. باد یکی از سیستم های تولید انرژی در دسترس و اقتصادی است که در آن از ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه استفاده شده است که سیم پیچ- های استاتور آن مستقیما به شبکه قدرت متصل می شوند و سیم پیچ های روتور آن توسط یک مبدل فرکانسی به سیستم قدرت اتصال می یابد (شکل 1) [10]. یکی از مشکلاتی که بطور معمول در ارتباط با توان دریافت شده از باد ذکر می شود، کنترل توان راکتیو تولید شده یا مصرف شده در نیروگاه های بادی می باشد. با بکار بردن روش های کنترلی مناسب، توان راکتیو می تواند مستقل از توان اکتیو ژنراتور و با در نظر گرفتن محدودیت های مربوط به ظرفیت حرارتی ماشین کنترل گردد. روش کنترل برداری مستقیم سبب کنترل مستقیم توان های راکتیو و اکتیو ماشین می- شود. [11-19]

چکیده - یکی از قدرتمندترین روش های کنترل درایو ماشین های القایی روش کنترل برداری مستقیم می باشد. این روش کنترلی وابسته به تخمین شار است. این مقاله به تحلیل و بررسی روش کنترل برداری مستقیم برای ژنراتور القایی دو سو تغذیه می پردازد که برای سیستم های تولیدی بادی بکار می رود. با توجه به ماهیت متغیر سرعت باد مدل جبران کننده شاری پیشنهاد شده است که درایو کنترل سرعت را نسبت به تغییرات باد مقاوم می سازد. کنترل برداری مستقیم بیشتر در درایوهای موتور القایی با روتور قفس سنجابی بکار می رود. در این مقاله ایده کنترل برداری مستقیم برای ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده که با مبدل VSI به شبکه قدرت متصل شده است بکار رفته است. کنترل گشتاور و شار در این روش به ترتیب به کنترل غیر مستقیم توان های اکتیو و راکتیو منجر می شود. روش پیشنهادی با استفاده از اطلاعات یک ماشین القایی موجود در نرم افزار متلب، در محیط سیمولینک شبیه سازی شده است که نتایج شبیه سازی شده موید ادعاهای ارائه شده هستند.

واژه های کلیدی - توربین بادی ، جبران شار، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، کنترل برداری مستقیم، بهبود پاسخ زمانی

### 1- مقدمه

کنترل ماشین های القایی به طرز چشمگیری پیچیده تر از کنترل ماشین های جریان مستقیم می باشند، و اگر کارایی بالایی از ماشین انتظار رود، بر این پیچیدگی افزوده می شود. در حقیقت این پیچیدگی به علت ساختار چند متغیره و غیر خطی موتور القایی است. رایج ترین روش کنترل سرعت در ماشین های القایی، کنترل برداری است [1]. کنترل برداری مستقیم [2-8] یکی از قدرتمندترین روش های کنترل درایو ماشین ها القایی است،



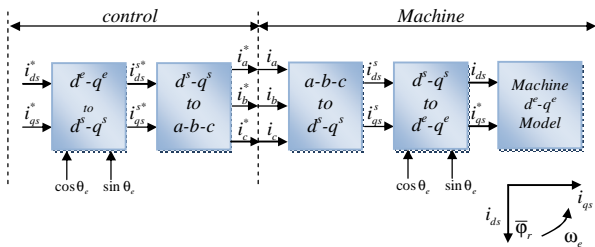
شکل 1: ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به شبکه قدرت

حجت مویدی راد ، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه بیرجند،  
[hojatrada@yahoo.com](mailto:hojatrada@yahoo.com)  
محمدعلی شمسی نژاد ، استادیار گروه قدرت دانشگاه بیرجند،  
[Shamsi@yahoo.com](mailto:Shamsi@yahoo.com)  
رضا ابولی ، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه بیرجند،  
[rezaaboli@yahoo.com](mailto:rezaaboli@yahoo.com)

### 3- کنترل برداری موتور القایی

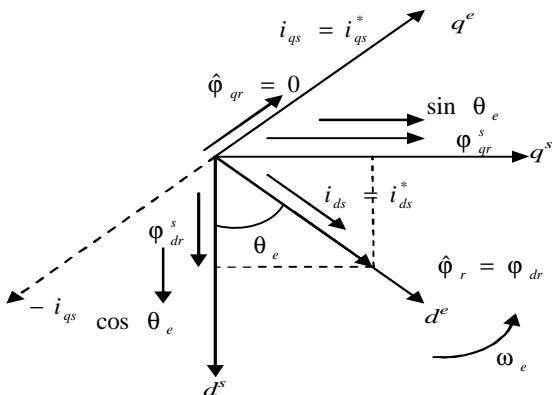
#### 1-3- مدل ماشین القایی

بلوک دیاگرام کنترل برداری مدل d-q ماشین القایی بصورت شکل (3) می باشد که به کمک آن می توان ساختار کنترل را بر اساس مدل ماشین تشریح کرد. پارامترهای اصلی کنترل  $i_{ds}^*$  و  $i_{qs}^*$ ، که مقادیری DC هستند، به کمک سیگنال های سینوس و کسینوس از روی سیگنال شار ساخته می شوند.



شکل 3: بلوک دیاگرام کنترل برداری مدل d-q ماشین القایی

محورهای متعامد و مستقیم به صورت فازوری در ماشین القایی در شکل (4) نشان داده شده اند [1]:



شکل 4: دیاگرام برداری مولفه های ds-q و de-q در ماشین القایی

معادلات زیر برای شبیه سازی موتور در محیط نرم افزار متلب مورد استفاده قرار گرفته اند [1].

$$\Phi_{ds}^s = \int (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt \quad (2)$$

$$j_{qs}^s = \int (v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt \quad (3)$$

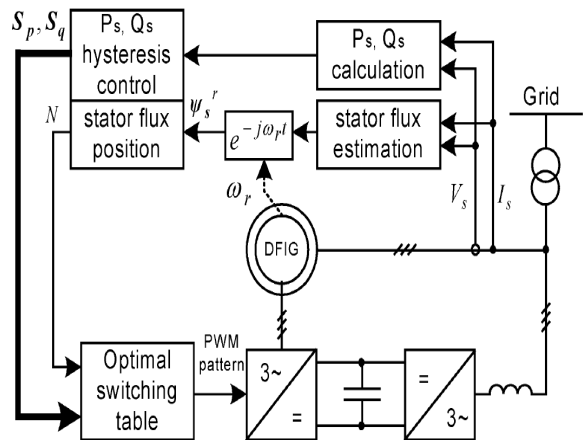
$$\Phi_{qm}^s = \Phi_{qs}^s - L_{ls} i_{qs}^s \quad (4)$$

$$j_{dm}^s = j_{ds}^s - L_{ls} i_{ds}^s \quad (5)$$

$$j_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} j_{qm}^s - L_{lr} i_{qs}^s \quad (6)$$

$$\Phi_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} \Phi_{dm}^s - L_{lr} i_{qs}^s \quad (7)$$

یک مدل معمول کنترل برداری مستقیم ژنراتور القایی از دو سو تغذیه متصل به شبکه قدرت در شکل (2) نشان داده شده است [20].



شکل 2: بلوک دیاگرام کنترل برداری مستقیم ژنراتور القایی از دو سو تغذیه

تغییر سرعت باد بر رفتار کنترل کننده ضریب توان نامناسب دارد. در این مقاله، برای اینکه درایو کنترل سرعت نسبت به تغییرات باد مقاوم شود از یک جبران ساز شار روتور، استفاده شده است. در مدل ارائه شده جبران شار هنگامی وجود دارد که خطای گشتاور وجود داشته باشد و وقتی خطای گشتاور صفر شود به صورت خود به خود عمل جبران سازی متوقف خواهد شد و ماشین در ناحیه تضعیف شار به کار خود ادامه خواهد داد.

ساختار ادامه مقاله بدین شرح است: مدل توربین بادی استفاده شده در بخش 2 معرفی شده است. در بخش 3 روش کنترل برداری ژنراتور القایی ارائه شده و مدل پیشنهادی برای جبران شار روتور در بخش 4 تشریح شده است. در بخش 5 بر روی نتایج شبیه سازی بحث و در خاتمه نتیجه گیری در بخش 6 آمده است.

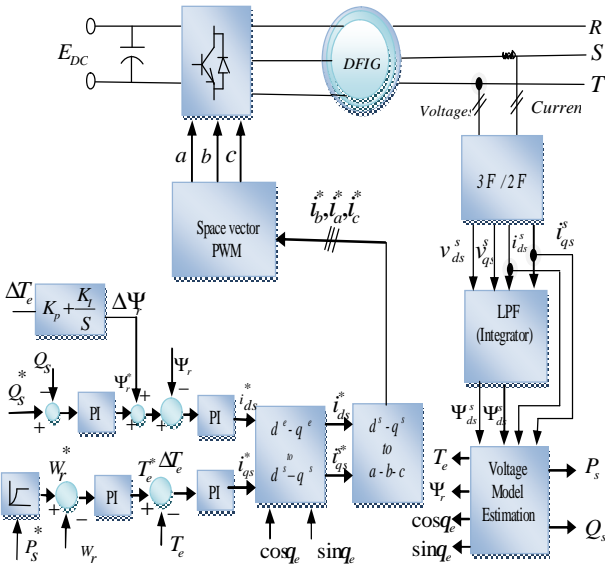
#### 2- مدل توربین بادی

مدل های متفاوتی برای محاسبه توان حاصل از نیروی باد برای یک توربین بادی وجود دارد. که در این مقاله از مدل موجود در مرجع [21] بصورت زیر استفاده شده است:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} c_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 v^3 \quad (1)$$

که پارامترهای آن در جدول (1) تعریف شده اند. در رابطه (1)  $c_p(\lambda)$  ثابت توان بوده و تابع غیر خطی از سرعت باد و سرعت زاویه ای توربین می باشد.

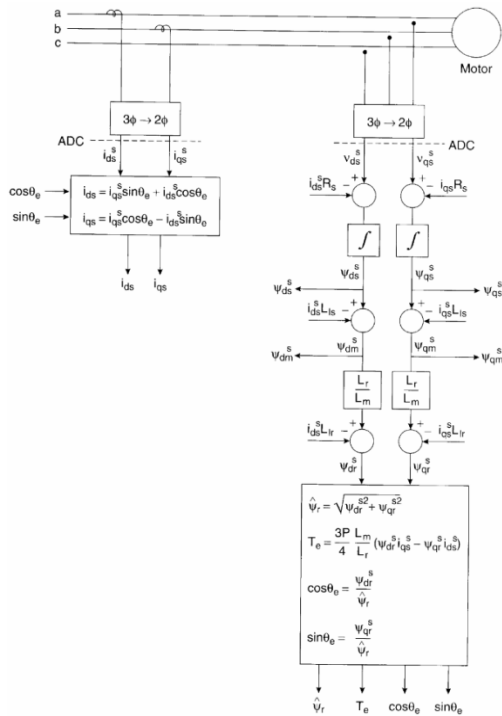
بلوک دیاگرام درایو پیشنهادی کنترل سرعت ماشین القایی در شکل (5) نشان داده شده است.



شکل 5: نمایش شماتیکی درایو کنترل سرعت پیشنهادی

2-3- تخمین سیگنال های برگشتی مدل ولتاژ

روش کنترل برداری مستقیم بستگی به تولید سیگنال های بردار واحد از روی فاصله هوایی دارد. همان طور که در شکل (6) نشان داده شده است، شارهای شکاف هوایی  $\Phi_{dm}^s$  و  $\Phi_{qm}^s$  را می توان از روی مقادیر ولتاژ استاتور و جریان ها تخمین زد. جریان های استاتور مستقیماً از طریق سنسورهای جریان اندازه گیری می شوند و شار روتور و گشتاور و سیگنال های سینوس و کسینوس با توجه به شکل (6) تخمین زده می شود.



شکل 6: نمایش بلوک دیاگرام تخمین سیگنال های برگشتی مدل ولتاژ

$$T_e = \frac{3P}{4} (j_{ds}^s i_{qs}^s - j_{qs}^s i_{ds}^s) \tag{8}$$

$$j_r = \sqrt{(j_{qr}^s)^2 - (j_{dr}^s)^2} \tag{9}$$

$$\cos \theta_e = \frac{j_{dr}^s}{j_r} \tag{10}$$

$$\sin \theta_e = \frac{\Phi_{qr}^s}{\Phi_r} \tag{11}$$

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{qs} - V_{ds} i_{ds}) \tag{12}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \tag{13}$$

پارامترهای مورد استفاده در روابط بالا در جدول (1) تعریف شده اند. جدول 1: معرفی پارامترهای بکار رفته در مدل سازی ژنراتور القایی

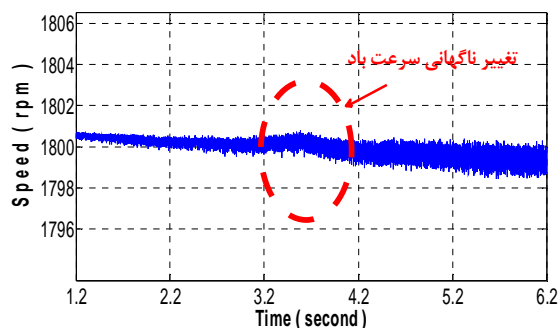
$v_{ds}^s (v_{qs}^s)$	ولتاژ استاتور در محور مستقیم (محور متعامد)
$i_{ds}^s (i_{qs}^s)$	جریان استاتور در محور مستقیم (محور متعامد)
$\Phi_{ds}^s (\Phi_{qs}^s)$	شار استاتور در محور مستقیم (محور متعامد)
$\Phi_{dm}^s (\Phi_{qm}^s)$	شار فاصله هوایی در محور مستقیم (محور متعامد)
$\Phi_{dr}^s (\Phi_{qr}^s)$	شار روتور در محور مستقیم (محور متعامد)
$R_s$	مقاومت استاتور
$L_{ls}$	اندوکتانس نشتی استاتور
$L_{lr}$	اندوکتانس نشتی روتور
$L_m$	اندوکتانس مغناطیس کننده
$L_r$	اندوکتانس روتور
P	تعداد زوج قطب
$P_{mech}$	توان مکانیکی کسب شده
$c_p(I)$	ثابت توان
$l$	سرعت نوک پره
$r$	چگالی هوا
$R$	شعاع توربین
$v$	سرعت باد
$P_s$	توان اکتیو
$Q_s$	توان راکتیو



## 7- مراجع

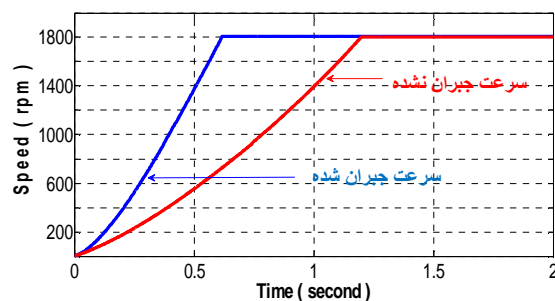
- [1] B. K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [2] T. G. Habetler et al., "Direct torque control of induction machines using space vector modulation", IEEE Trans. Ind. Application., vol. 28, pp. 1045–1053, Sept./Oct. 1992.
- [3] I. Takahashi and Y. Ohmori, "High-performance direct torque control of an induction motor", IEEE Trans. Ind. Application., vol. 25, pp. 257–264, Mar./Apr. 1989.
- [4] J. N. Nash, "Direct torque control, induction motor vector control without an encoder," IEEE Trans. Ind. Application., vol. 33, pp. 333–341, Mar./Apr. 1997.
- [5] D. Casadei, G. Serra and A. Tani, "Implementation of a direct torque control algorithm for induction motor based on discrete space vector modulation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, pp. 769–777, July 2000.
- [6] S. Mir, M. E. Elbuluk and D. S. Zinger, "PI and fuzzy estimators for tuning the stator resistance in direct torque control of induction machines," IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, pp. 279–287, Mar. 1998.
- [7] P. Kazmierkowski and B. Kasprowicz, "Improved direct torque and flux vector control of PWM-fed induction motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, pp. 344–349, Aug. 1995.
- [8] M.P. Kazmierkowski, "A novel vector control scheme for transistor PWM inverter-fed induction motor drive", IEEE Trans. On Ind. Vol. 38, No. 1, pp. 41-47, Feb 1991.
- [9] S. Arnalte; J. C. Burgos; J. L. Rodríguez-Amenedo, "Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Turbines", Electric Power Components and Systems, Publisher Taylor & Francis, 30: 2, pp. 199 - 216, 23 December 2009.
- [10] Ahmed G. Abo-Khalil, and Dong-Choon Lee, and Se-Hyun Lee, "Grid Connection of Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Conversion System", IEEE IPEMC Conf. Proc., 2006.
- [11] B. Rabelo, W. Hofmann; "Optimal active and reactive power control with the doubly-fed induction generator in the MW-class wind turbines", IEEE, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.53-58, vol 1. Oct.2001.
- [12] S. A. Gomez, and J. L. R. Amenedo, "Grid synchronization of doubly fed induction generators using direct torque control," IEEE IECOM Conf. Proc., vol. 4, pp. 3338-3343, 2002.
- [13] G. Yuan, J. Chai, and Y. Li, "Vector control and synchronization of doubly fed induction wind generator system," The 4th International PEMC Conf., Vol. 2, pp. 886-890, 2004.
- [14] D. J. Atkinson, R. A. Lakin, and R. Jones, "A vector-controlled doubly-fed induction generator for a variable-speed wind turbine application", Trans. Inst. Meas. Contr., vol. 19, no. 1, pp. 2–12, 1997.
- [15] R. S. Peña, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Vector control of a variable speed doubly-fed induction machine for wind generation systems. EPEJ. vol. 6, no. 3-4, pp. 60–67, Dec. 1996.
- [16] M. P. Kazmierkowski and A. Kasprowicz, "Improved direct torque and flux vector control of PWM inverter-fed induction motor drives", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, no. 4, pp. 344–350, Aug. 1995.
- [17] T. G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, and L. M. Tolbert, "Direct torque control of induction machines using space vector modulation". IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 5, pp. 1045–1053, Sep. 1992.
- [18] Y. S. Lai and J. H. Chen, "A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 16, no. 3, pp. 220–227, Sep. 2001.

پیشنهادی، این نوسانات برطرف شده است. با تغییر سرعت باد جبران ساز شار روتور وارد مدار می شود.



شکل 12: نتیجه شبیه سازی برای سرعت 1800rpm با جبران شار روتور

شکل (13) مدل سازی را در سرعت 1800rpm در دو حالت مختلف نشان می دهد. در حالت جبران شار روتور (منحنی آبی) پاسخ زمانی درایو نسبت به حالتی که شار جبران نشده است (منحنی قرمز) به مقدار چشمگیری بهبود یافته و سریعتر شده است.



شکل 13: نتایج شبیه سازی برای سرعت های 1800rpm در حالت جبران شده و جبران نشده

## 6- نتیجه گیری

هدف این مقاله، مقاوم سازی کنترل سرعت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه با جبران ساز شار روتور است. با استفاده از سیگنال خطای گشتاور، مدلی برای جبران شار روتور ارائه شده است و با این کار هدف ذکر شده برآورده شده است. جبران شار تا زمانی ادامه دارد که خطای گشتاور وجود داشته باشد، وقتی خطای گشتاور صفر شود به صورت خود به خود عمل جبران سازی متوقف خواهد شد. نتایج شبیه سازی به خوبی بهبود پاسخ زمانی درایو ماشین القایی و عملکرد مطلوب درایو در سرعت های متغیر باد را نشان می دهد. توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به خاطر کنترل ولتاژ مدار روتور از طریق مبدل الکترونیک قدرت قادر به کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی خود است. همچنین با توجه به اینکه این نوع توربین ها قادر به کنترل سرعت نیز میباشند نوسانات مکانیکی در این توربین ها کمتر است.

- [19] N. R. N. Idris and A. H. M. Yatim, "Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 758–767, Aug.2004.
- [20] Lie Xu, , Phillip Cartwright," Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 21, NO. 3, pp.750- 758, SEPTEMBER 2006.
- [21]. A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza; "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp.194-204. June 2003
- [22] Jun Hu and Bin Wu," New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux over a Wide Speed Range", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 13, NO. 5, pp.969-976, SEPTEMBER 1998.