

# راهاندازی و کنترل سرعت موتور القایی با استفاده از باتری

حاتم عبدالرحیمی<sup>۱</sup>، امجد ساجدی<sup>۲</sup>، حسین محمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> مربی، گروه برق، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)  
<sup>۲</sup> هیئت علمی، گروه برق، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)

## چکیده:

در این مقاله فرمول‌های اساسی و پایه یک موتور القایی سه فاز به کمک تبدیل پارک به فضای dq منتقل و استخراج می‌شود و در M-file نرم‌افزار متلب با استفاده از تقریب اویلر، یک نمونه موتور القایی مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌گردد و سپس موتور مربوطه با استفاده از کنترل آبخاری و توسط یک باتری، راه‌اندازی می‌شود و در سرعت‌های مختلف مورد بهره‌برداری و کنترل قرار می‌گیرد. در پایان، نمودارهای مختلف موتور القایی در شرایط کاری متفاوت ارائه می‌شود. نمودارهای عملکردی موتور نشان می‌دهد که با استفاده از روش کنترلی پیشنهادشده، موتور می‌تواند به راحتی سرعت‌های مرجع را در سریع‌ترین زمان ممکن دنبال کند که این امر صحت مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده را به اثبات می‌رساند. با کنترل سرعت موتورهای القایی، این موتورها می‌توانند جایگزین مناسبی برای موتورهای DC فعلی در شناورهای نیروی دریایی باشند؛ زیرا هم هزینه نگهداری و تعمیرات آن‌ها نسبت به موتورهای DC کمتر است و هم از لحاظ راندمان کاری از شرایط بهتری برخوردارند.

## واژه‌های کلیدی:

کنترل سرعت موتور القایی، موتورهای جریان مستقیم، PWM

## Induction Motor Starting With DC Link

Hatam Abdorrahimi, Amjad Sajedi, Hossein Mohammadi

Department of Electricity, Imam Hossein University

### Abstract:

In this paper, the basic formulas of a three-phase induction motor are extracted and by Park\_ Transfer Matrix are converted to dq space, then in m\_file MATLAB software, are modeled and simulated. The aforementioned three-phase induction motor using cascade control and by A battery is set up and operated and controlled at different speeds. In the end, different diagrams of three-phase induction motor are presented in different working conditions. After carefully examining of the diagrams of three-phase induction motor, proves the accuracy of the proposed control method and its simulations. performance diagrams show that using the proposed control method, the motor can easily follow the reference speeds in the fastest possible time, which proves the accuracy of the modeling and simulations performed. By controlling the speed of induction motors, application of Direct Current motors in Navy of the Islamic Republic of Iran vessels, which are very expensive to maintain, can be eliminated.

### Keywords:

Direct Current motor, control of induction motor, PWM.

• پاسخ سرعت موتورهای DC چندان قابل قبول نیست.

• راندمان این موتورها نسبتاً پایین است.

در این مقاله سعی شده است که با ارائه مدل ریاضی یک موتور القایی سه فاز و راهاندازی آن به کمک یک باتری، راهکار جدید برای حذف موتورهای پردردسر DC از شناورهای نیروی دریایی رقم بخورد [7-9].

## ۲- مدل سازی

برای مدل سازی یک موتور القایی سه فاز در محیط M-file نرم افزار متلب، باید با استفاده از تبدیل پارک معادلات ولتاژ استاتور و روتور موتور القایی را به محور مرجع dq انتقال داد.

$$V_s^q = R_s i_s^q + \frac{d\lambda_s^q}{dt} + \omega_s \lambda_s^d$$

$$V_s^d = R_s i_s^d + \frac{d\lambda_s^d}{dt} - \omega_s \lambda_s^q \quad (1)$$

$$V_s^0 = R_s i_s^0 + \frac{d\lambda_s^0}{dt}$$

$$V_r^q = R_r i_r^q + \frac{d\lambda_r^q}{dt} + \omega_r \lambda_r^d$$

$$V_r^d = R_r i_r^d + \frac{d\lambda_r^d}{dt} - \omega_r \lambda_r^q \quad (2)$$

$$V_r^0 = R_r i_r^0 + \frac{d\lambda_r^0}{dt}$$

که در آن  $w_r, w_s$  به ترتیب سرعت میدان مغناطیسی استاتور و روتور می باشد. از آنجایی که  $v_r = 0$ ، معادلات جریان های استاتور و روتور در محورهای dq به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\frac{di_s^q}{dt} = \frac{v_s^q}{L_1} - \frac{L_4}{L_1} v_r^q - \frac{R_s}{L_1} I_s^q + \frac{L_2}{L_1} I_r^q + \left( \frac{L_3}{L_1} w_m - \frac{L_{ss}}{L_1} w_s \right) I_s^d + \frac{L_m}{L_1} w_r I_r^d \quad (3)$$

$$\frac{di_r^q}{dt} = \frac{v_s^q}{L_5} - \frac{L_7}{L_5} v_r^q - \frac{R_s}{L_5} I_s^q + \frac{R_r L_r}{L_5} I_r^q + \frac{L_{ss}}{L_5} (w_m - w_s) I_s^d + \left( \frac{L_6}{L_5} w_m - \frac{L_m}{L_5} w_s \right) I_r^d \quad (4)$$

$$\frac{di_s^d}{dt} = \frac{v_s^d}{L_1} - \frac{L_4}{L_1} v_r^d - \frac{R_s}{L_1} I_s^d + \frac{R_r L_4}{L_1} I_r^d + \left( \frac{L_{ss}}{L_1} w_s - \frac{L_3}{L_1} w_m \right) I_s^q + \frac{L_m}{L_1} (w_s - w_m) I_r^q \quad (5)$$

$$\frac{di_r^d}{dt} = \frac{v_s^d}{L_5} - \frac{L_7}{L_5} v_r^d - \frac{R_s}{L_5} I_s^d + \frac{R_r L_7}{L_5} I_r^d + \frac{L_{ss}}{L_5} (w_s - w_m) I_s^q + \left( \frac{L_m}{L_5} w_s - \frac{L_6}{L_5} w_m \right) I_r^q \quad (6)$$

امروزه موتورهای القایی به دلیل استحکام بالا، قابلیت اطمینان، قیمت پایین و راندمان مطلوب، محبوب ترین موتورهای مورد استفاده در بخش های صنعتی، تجاری و دریایی هستند [1]. با این وجود، عدم کنترل سرعت موتورهای القایی و محدود بودن سرعت چرخش آنها، در دو الی سه سرعت خاص، یکی از بزرگترین معایب این موتورها به شمار می رود. به همین علت، در مواردی که کنترل سرعت شفت موتور مدنظر باشد، از موتورهای DC استفاده می شود [2-5]. از این رو، موتورهای DC در شناورهای نیروی دریایی کاربرد فراوانی دارند.

مزیتی که موتورهای AC بر موتورهای DC دارند این است که هزینه تعمیر و نگهداری آنها بسیار کمتر است و برای راه اندازی و فعالیت به یک منبع DC احتیاج ندارند. همچنین همه موتورهای الکتریکی DC تک فاز هستند اما موتورهای AC می توانند تک فاز یا سه فاز باشند. ایجاد جرقه بین کموتاتورها در موتورهای DC یکی دیگر از مشکلات از نوع موتورها است که باعث می شود، در محیط های قابل اشتعال و انفجار، از این موتورها استفاده نمی شود [6]. به طور کلی، معایب موتورهای DC را می توان به موارد زیر دسته بندی کرد:

- موتورهای DC دارای کموتاتور و جاروبک هستند
- استهلاک بالایی دارند و هزینه های ناشی از نگهداری و تعمیرشان زیاد است.
- موتورهای DC که قدرت بالایی دارند دارای ابعاد بسیار بزرگی هستند.
- این موتورها نسبت به موتورهای AC قیمت بالایی دارند.
- این موتورها برای راه اندازی به جریان برق مستقیم احتیاج دارند.

که در آن مقادیر  $L_1$  تا  $L_7$ ، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$L_1 = L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \quad L_2 = \frac{R_r L_m}{L_{rr}}$$

$$L_3 = \frac{L_m^2}{L_{rr}} \quad L_4 = \frac{L_m}{L_{rr}} \quad L_5 = L_m - \frac{L_{rr} L_{ss}}{L_m}$$

$$L_6 = \frac{L_{ss} L_{rr}}{L_m} \quad L_7 = \frac{L_{ss}}{L_m}$$

معادلات مذکور با استفاده از تقریب مشتق اویلر به معادلات گسسته با زمان تبدیل می‌شود. معادله‌ی تقریب مشتق اویلر در زیر آورده شده است. (۷)

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s}$$

که در آن  $k$  شماره‌ی نمونه‌برداری و  $T_s$  پله‌ی زمانی این نمونه‌برداری‌ها است.

### ۳- روش کنترل

در روش‌های کنترلی، زمانی که چند سیگنال توسط سنسورهای مختلف، اندازه‌گیری شود و یک متغیر کنترل شده وجود داشته باشد؛ از روش کنترل آبخاری استفاده می‌کنیم. در موتور القایی کنترل شده، سیگنال‌های جریان استاتور موتور القایی و سیگنال سرعت شفت موتور توسط سنسورها اندازه‌گیری شده و سرعت نهایی موتور، به عنوان متغیر کنترل شده تعریف می‌شود [10-12].

بلوک دیاگرام کنترلی موتور القایی با استفاده از یک باتری، در شکل ۱، نشان داده شده است. در ابتدا، در فضای M-file نرم‌افزار متلب، یک موتور القایی سه فاز بر اساس روابط ریاضی، مدل‌سازی و کدنویسی می‌شود. از سرعت خروجی موتور نمونه‌برداری می‌شود و سپس با مقادیر مرجعی که توسط کاربر به موتور داده می‌شود؛ مقایسه می‌گردد. اختلاف سرعت موتور با سرعت مرجع به عنوان ورودی به دیاگرام کنترلی موتور وارد می‌شود. از آنجایی که موتور

القایی نمی‌تواند در هر سرعتی هر توانی را تولید کند، بنابراین لازم است که نمودار گشتاور-سرعت موتور القایی به عنوان شرط در سیستم کنترلی موتور قرار گیرد. پس از مقایسه نقطه کار موجود موتور با نمودار گشتاور-سرعت موتور، جریان‌های استاتور موتور با مقادیر خروجی از نمودار گشتاور-سرعت مقایسه می‌گردد و ما به تفاوت این مقادیر به عنوان موج حامل در روش PWM مورد استفاده قرار می‌گیرد [13-16]

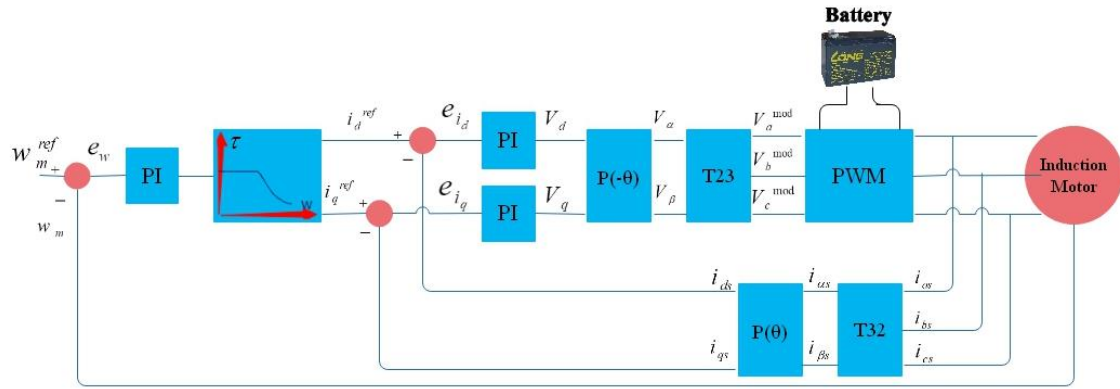
### ۴- شبیه‌سازی

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است؛ فرض می‌شود که مقدار سرعت مرجع در زمان راه‌اندازی موتور ۱۰۰ دور بر دقیقه است و در زمانهای ۰.۵ و یک ثانیه، سرعت‌های مرجع موتور به مقدار ۰.۷۵ و ۱۵۰ دور بر دقیقه توسط کاربر تغییر کند.

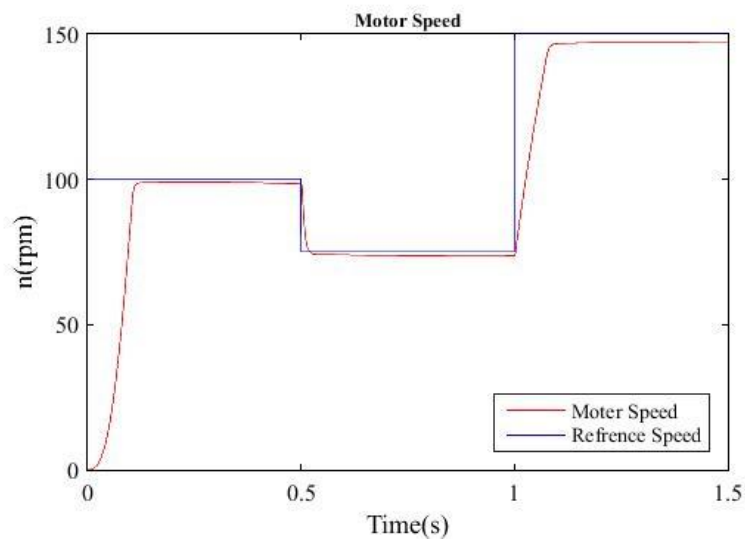
منحنی سرعت مکانیکی موتور القایی که در شکل ۲ با رنگ قرمز نشان داده شده است، به راحتی، مقدار سرعت مرجع را دنبال می‌کند، موتور به راحتی راه‌اندازی می‌شود و کاملاً تحت کنترل است که این موضوع درستی و صحت مدل‌سازی، شبیه‌سازی و روش کنترلی بیان شده در بالا را اثبات می‌کند.

شکل ۳، تغییرات گشتاور مغناطیسی تولید شده در موتور را نشان می‌دهد، در زمان راه‌اندازی، موتور برای دور گرفتن و رسیدن به سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه، گشتاور مغناطیسی بالایی تولید می‌کند و در زمان ۰.۵ ثانیه با کاهش سرعت مرجع، گشتاور مغناطیسی منفی ایجاد می‌شود و دوباره در زمان ۱ ثانیه، گشتاور مغناطیسی مثبت برای بالا بردن سرعت مکانیکی موتور ایجاد می‌شود.

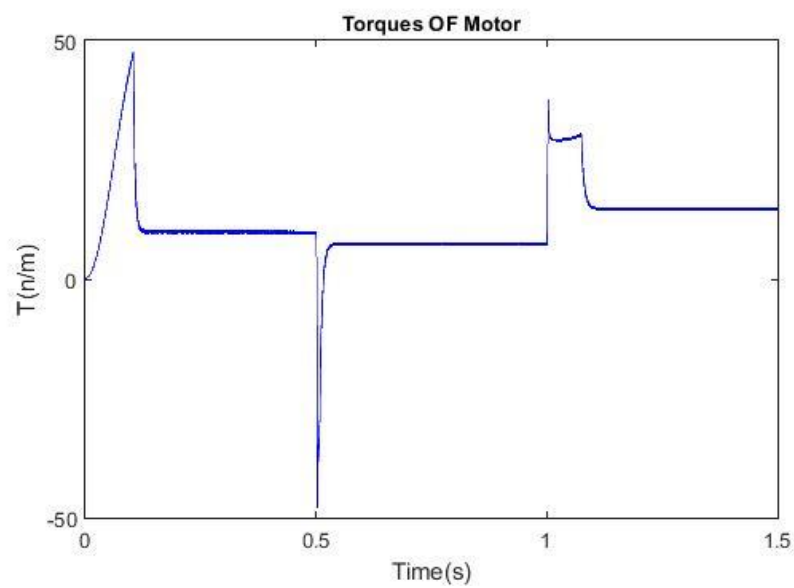
شکل ۴ جریان کشیده شده از شبکه توسط موتور القایی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار و فرکانس جریان کشیده شده از شبکه، متناسب با افزایش و کاهش سرعت مکانیکی شفت ژنراتور تغییر می‌کند.



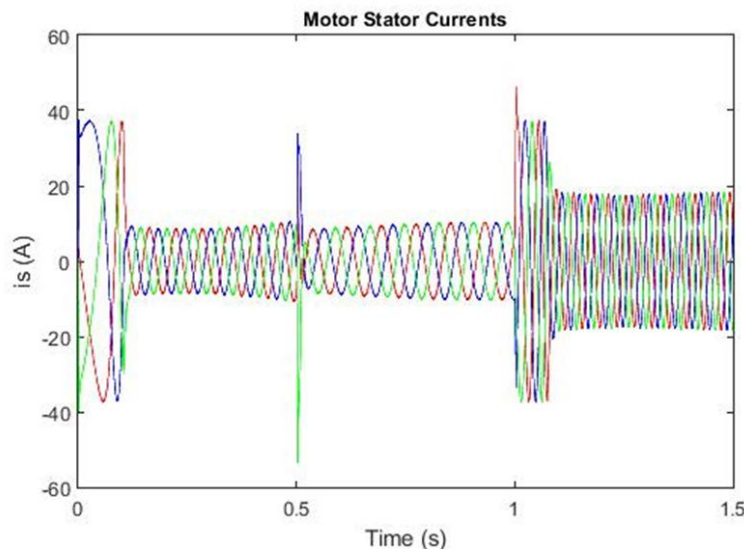
شکل ۱- بلوک دیاگرام کنترلی موتور القایی



شکل ۲- سرعت شفت موتور القایی



شکل ۳- گشتاور مغناطیسی القاء شده در موتور القایی



شکل ۴- جریان کشیده شده از شبکه

Unbalanced Grid Driven by a Direct Matrix Converter", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 3, (2019), 1380–1392. doi:10.1109/TSTE.2018.2868406

3. Esfandiari, G., Ebrahimi, M., and Tabesh, A., "Instantaneous Torque Control Method With Rated Torque-Sharing Ratio for Cascaded DFIMs", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 11, (2017), 8671–8680. doi:10.1109/TPEL.2017.2650211

4. Norouzia, S., Ghoreishy, H., Ale Ahmad, A., and Tahami, F., "A New Variable Frequency Zero Voltage Switching Control Method for Boost Converter Operating in Boundary Conduction Mode", International Journal of Engineering, Transaction B: Applications, Vol. 33, No. 11, (2020), 2222–2232. doi:10.5829/ije.2020.33.11b.14

5. Sun, D., Wang, X., Nian, H., and Zhu, Z. Q., "A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 2, (2018), 1313–1322. doi:10.1109/TPEL.2017.2686980

6. Liu, Y., Xu, W., Zhi, G., and Zhang, J., "Performance Analysis of a Stand-alone Brushless Doubly-fed Induction Generator Using a New T-type Steady-state Model", Journal of Power Electronics, Vol. 17, No. 4, (2017), 1027–1036. doi:https://doi.org/10.6113/JPE.2017.17.4.1027

7

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله درستی روش کنترل آبخاری با PWM برای کنترل سرعت موتور القایی اثبات شد، می توان روش ارائه در این مقاله را با روش مرسوم کنترلی مانند کنترل برداری، کنترل هیستریزیس و کنترل DTC مقایسه نمود و نقاط ضعف و قوت هرکدام از روش های کنترلی مذکور را استخراج نمود.

در این مطالعه، ابتدا یک موتور القایی مدل سازی و شبیه سازی شد و با استفاده از یک باتری راه اندازی و در سرعت های مختلف مورد بهره برداری قرار گرفت. فرمول ها و راهکار ارائه شده در این مقاله را می توان مقدمه ای بر حذف موتورهای DC در شناورهای نیروی دریایی دانست که به علت خرابی زیاد، هزینه های بالایی را به سازمان وارد می نماید.

#### مراجع

- Jabbour, N., Tsioumas, E., Mademlis, C., and Solomin, E., "A Highly Effective Fault-Ride-Through Strategy for a Wind Energy Conversion System With a Doubly Fed Induction Generator", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 8, (2020), 8154–8164. doi:10.1109/TPEL.2020.2967971
- Gontijo, G. F., Tricarico, T. C., Franca, B. W., da Silva, L. F., van Emmerik, E. L., and Aredes, M., "Robust Model Predictive Rotor Current Control of a DFIG Connected to a Distorted and

in Power Electronics, Vol. 7, No. 2, (2019), 967–975. doi:10.1109/JESTPE.2019.2898924

15. Xu, W., Gao, J., Liu, Y., and Yu, K., "Model predictive current control of brushless doubly-fed machine for stand-alone power generation system", IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (2017), 322–327. doi:10.1109/IECON.2017.8216058

16. Xu, W., Hussien, M. G., Liu, Y., and Allam, S. M., "Sensorless Control of Ship Shaft Stand-Alone BDFIGs Based on Reactive-Power MRAS Observer", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 9, No. 2, (2021), 1518–1531. doi:10.1109/JESTPE.2019.2963264

7. Sadeghi, R., Madani, S. M., and Ataei, M., "A New Smooth Synchronization of Brushless Doubly-Fed Induction Generator by Applying a Proposed Machine Model", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, No. 1, (2018), 371–380. doi:10.1109/TSTE.2017.2734964

8. Kou, P., Liang, D., Li, J., Gao, L., and Ze, Q., "Finite-Control-Set Model Predictive Control for DFIG Wind Turbines", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 15, No. 3, (2018), 1004–1013. doi:10.1109/TASE.2017.2682559

9. Chen, J., Zhang, W., Chen, B., and Ma, Y., "Improved Vector Control of Brushless Doubly Fed Induction Generator under Unbalanced Grid Conditions for Offshore Wind Power Generation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 31, No. 1, (2016), 293–302. doi:10.1109/TEC.2015.2479859

10. Khateri-abri, S., Tohidi, S., and Rostami, N., "Improved Direc Power Control of DFIG Wind Turbine by using a Fuzzy Logic Controller", 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), (2019), 458–463. doi:10.1109/PEDSTC.2019.8697581

11. Douadi, T., Harbouchea, Y., Abdessemed, R., and Bakhti, I., "Improvement Performances of Active and Reactive Power Control Applied to DFIG for Variable Speed Wind Turbine Using Sliding Mode Control and FOC", International Journal of Engineering, Transactions A: Basics, Vol. 31, No. 10, (2018), 1689–1697. doi:10.5829/ije.2018.31.10a.11

12. Hussien, M. G., Liu, Y., and Xu, W., "Robust position observer for sensorless direct voltage control of stand-alone ship shaft brushless doubly-fed induction generators", CES Transactions on Electrical Machines and Systems, Vol. 3, No. 4, (2019), 363–376. doi:10.30941/CESTEMS.2019.00048

13. Pichan, M., Rastegar, H., and Monfared, M., "Fuzzy-based direct power control of doubly fed induction generator-based wind energy conversion systems", 2012 2nd International EConference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), (2012), 66–70. doi:10.1109/ICCKE.2012.6395354

14. Rodrigues, L. L., Vilcanqui, O. A. C., Murari, A. L. L. F., and Filho, A. J. S., "Predictive Power Control for DFIG: A FAREBased Weighting Matrices Approach", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics