

مدلسازی توربین-ژنراتور بادی سرعت ثابت بر مبنای مدل مکانیکی دو جرمه

پیام واحدی^{۱*}، محسن رحیمی^۲.

۱- مربی موسسه آموزش عالی دانشستان، ساوه، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

خلاصه

در این مقاله، یک توربین-ژنراتور بادی سرعت ثابت به صورت متصل به یک شبکه ۲۰ کیلوولت به همراه سیستم کنترل زاویه گام پره مدلسازی و شبیه سازی شده است. به صورت رایج، سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور به صورت تک جرمه مدلسازی می شود. در این مقاله سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور (رتور و محور توربین-ژنراتور) به صورت دو جرمه مدلسازی شده است. این شیوه مدلسازی می تواند در مطالعه نوساناتی با فرکانس مد پیچشی در ولتاژ، جریان و توان ژنراتور بکار می رود. در ادامه مقاله، سیستم یکبار با مدل تک جرمه و بار دیگر با مدل دو جرمه در شرایطی که سرعت باد تغییر می کند، تحلیل و نتایج آن در توان، سرعت و گشتاور مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: توربین-ژنراتور سرعت ثابت، مدل مکانیکی دو جرمه، کنترل زاویه گام پره، ضریب بازدهی توربین.

۱. مقدمه

فناپذیری سوخت های فسیلی، تنوع بخشی به منابع انرژی، توسعه پایدار و ایجاد امنیت انرژی، مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی فسیلی از یک طرف و پاک و تجدیدپذیر بودن منابع انرژی های نو نظیر باد، خورشید، زیست توده و... از طرف دیگر، باعث توجه جدی جهانیان به توسعه و گسترش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و افزایش سهم این منابع در سبد انرژی جهانی شده است. از اینرو لزوم مطالعات علمی و تخصصی تر در رابطه با انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی بادی، بیش از پیش احساس می گردد. در این مقاله تلاش شده است یک توربین-ژنراتور بادی سرعت ثابت متصل به شبکه به طور کامل مدلسازی شود [1-3].

برای مطالعه رفتار حالت پایدار و دینامیک حالت گذرای یک توربین بادی باید قسمت های مختلف آن از جمله سیستم آیرودینامیک توربین، سیستم مکانیکی، ژنراتور و سیستم کنترل زاویه پره های توربین به گونه ای مناسب مدل شوند.

سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور اغلب به صورت تک جرمه مدل می شود. در مدل تک جرمه از خاصیت فیزیکی محور توربین-ژنراتور صرف نظر می شود و کل مجموعه توربین-ژنراتور به صورت یک جسم صلب مدل می شود [4-7]. مشکل این نوع مدلسازی این است که رفتار دینامیکی سیستم را در حالت گذرا به درستی نشان نمی دهند.

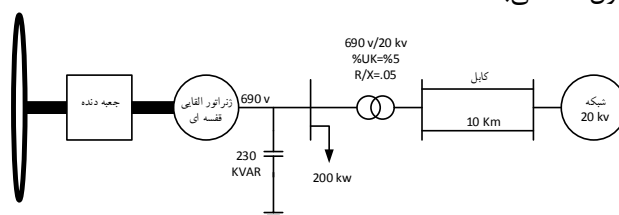
* Corresponding author:

Email: payam_vahedi@yahoo.com

در این مقاله سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور به صورت دو جرمه مدل سازی شده است. در ادامه سیستم در شرایطی که سرعت باد تغییر می کند، شبیه سازی شده است. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم تک جرمه و دو جرمه نشان داده شده است که سیستم دو جرمه به خوبی رفتار سیستم را در حالت گذرا مدل می کند.

۲. ساختار سیستم

در این مقاله یک توربین-ژنراتور سرعت ثابت متصل به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است. سطح اتصال کوتاه شبکه ۲۰ کیلوولت برابر ۱۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است. طول کابل ها ۱۰ کیلومتر و مشخصات آن ها مطابق جدول (۱) می باشد. مشخصات ژنراتور القایی در جدول (۲) آورده شده است. مشخصات توربین و جعبه دنده مطابق جدول (۳) می باشد.



شکل ۱- مدل سیستم

جدول ۱- مشخصات کابل ها

| پارامتر | توالی مثبت | توالی صفر |
|-------------|--------------|-------------|
| مقاومت | 0.1153 Ω/km | 0.413 Ω/km |
| اندکتانس | 1.05 mH/km | 3.32 mH/km |
| ظرفیت خازنی | 0.1153 nF/km | 0.413 nF/km |

جدول ۲- مشخصات ژنراتور

| پارامتر | مقدار |
|-------------------------------|----------------------|
| ولتاژ نامی | 690 v |
| فرکانس نامی | 50 Hz |
| توان نامی | 660 kw |
| تعداد قطب | 4 |
| ممان اینرسی | 28 kg/m ² |
| مقاومت سیم پیچ استاتور | 0.0048 Ω |
| راکتانس نشتی استاتور | 0.068 Ω |
| مقاومت ارجاع یافته رتور | 0.004 Ω |
| راکتانس نشتی ارجاع یافته رتور | 0.0897 Ω |

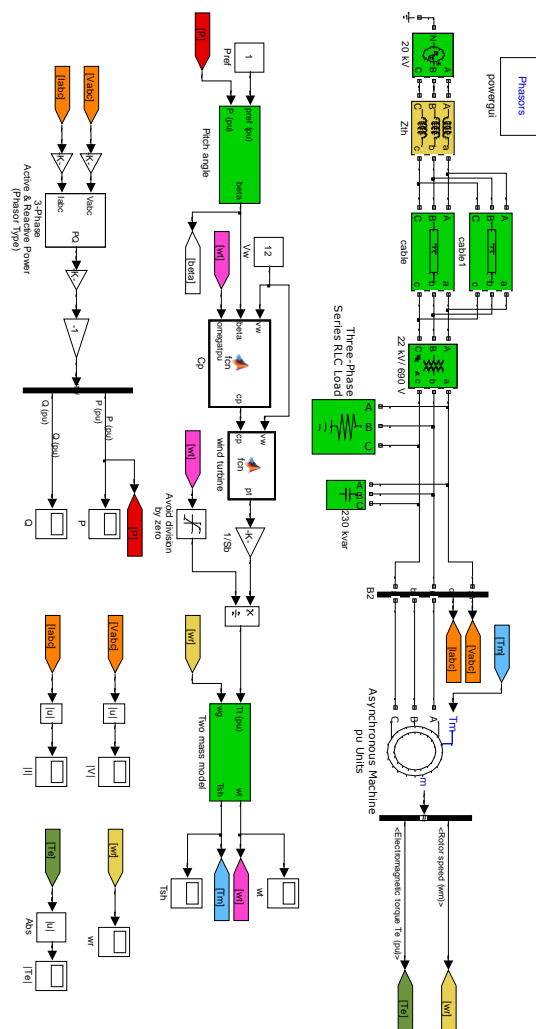
جدول ۳- مشخصات توربین و جعبه دنده

| پارامتر | مقدار |
|---------|-------|
|---------|-------|

| | |
|-------------------|--------------------------|
| ممان اینرسی | 520000 kg/m ² |
| ضریب میرایی | 1.5 p.u. |
| نسبت تبدیل گیربکس | 52.7 |
| قطر رتور | 47 m |

۳. مدل سازی سیستم

سیستم ارائه شده در شکل (۱) به صورت شکل (۲) مدل سازی شده است. در این مدل سیستم کنترل زاویه پره، سیستم آیرودینامیک توربین و سیستم مکانیکی به صورت مجزا مدل سازی شده اند. در ادامه به توضیح هر یک از این سیستم ها خواهیم پرداخت.



شکل ۲- مدل توربین-ژنراتور بادی سرعت ثابت متصل به شبکه

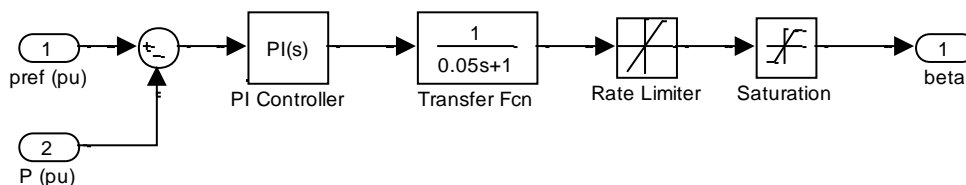
۴. مدل سازی سیستم کنترل زاویه پره

در سرعت های بالای باد زاویه پره ها به گونه ای تنظیم می شود که توان ژنراتور از مقدار نامی تجاوز نکند. همچنین در راه اندازی از کنترل زاویه پره ها جهت راه اندازی نرم استفاده می شود. مدل سیستم کنترل زاویه پره در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این مدل سیستم pitch servo به صورت یک تابع تبدیل مرتبه اول با ثابت زمانی ۰/۲ ثانیه مدل شده است. نرخ تغییرات زاویه پره ها ۱۰ درجه در ثانیه لحاظ شده است. ضرایب کنترلر PI به صورت زیر تنظیم شده اند:

$$K_p = 5$$

$$K_I = 25$$



شکل ۳- مدل سیستم کنترل زاویه پره

۵. مدل سازی سیستم آیرودینامیک توربین

سیستم آیرودینامیک توربین میزانی که توسط باد به محور توربین منتقل می شود را مشخص می کند. این توان به مشخصات طراحی پره، سرعت توربین، سرعت باد و زاویه پره وابسته است. توان مکانیکی منتقل شده به محور توربین توسط باد از رابطه (۱) بدست می آید [8,9].

$$p_t = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

ρ چگالی هوا می باشد که برابر ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب لحاظ می گردد. A مساحتی است که پره ها طی می کنند. V_w سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است. $C_p(\lambda, \beta)$ ضریب بازدهی توربین می باشد که در این مقاله به صورت معادله (۲) تخمین زده می شود.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_7 \left(C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲) ضرایب C_1 تا C_6 ضرایب ثابت بوده و به مشخصات آیرودینامیکی توربین وابسته بوده و به صورت زیر انتخاب می شوند:

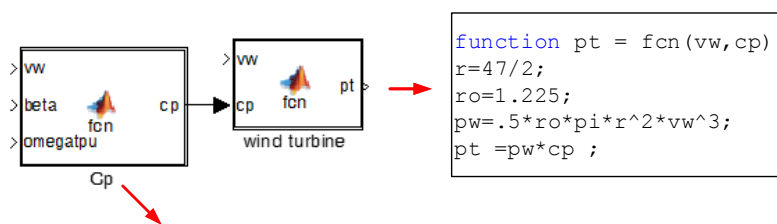
$$C_7 = 0.9 \text{ و } C_6 = 0.0068, C_4 = 5, C_3 = 0.4, C_2 = 116, C_1 = 0.5176$$

در رابطه (۲) λ و λ_i به ترتیب مطابق روابط (۳) و (۴) محاسبه می گردند.

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V_w} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

β زاویه پره های توربین، R شعاع پره های توربین و ω_t سرعت توربین می باشد. مدل سیستم آیرودینامیک توربین در شکل (۴) نشان داده شده است.

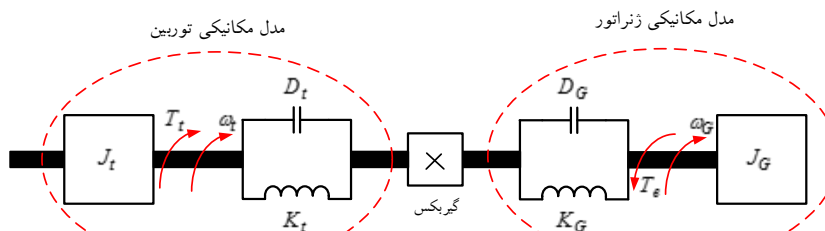


```
function cp = fcn(vw,beta,omegatpu)
beta1=beta*pi/180;
c1=0.5176;
c2=116;
c3=0.4;
c4=5;
c5=21;
c6=0.0068;
c7=0.9;
r=47/2;
omegat=omegatpu*50*pi/52.7+.0000001;
lambda=r*omegat/vw;
lambdai=1/(1/(lambda+0.08*beta1)-0.035/(beta1^3+1));
cp = c7*(c1*(c2/lambdai-c3*beta1-c4)*exp(-c5/lambdai)+c6*lambda);
```

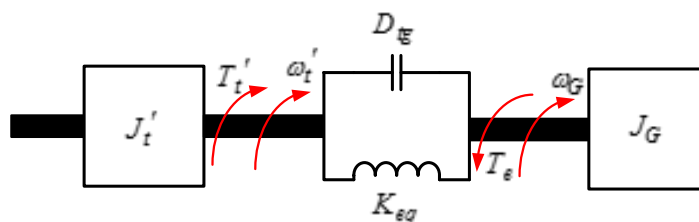
شکل ۴- مدل سیستم آیرودینامیک توربین

۶. مدل سازی سیستم مکانیکی

معمولا مدل مکانیکی توربین-ژنراتور به صورت تک جرمه مدل سازی می شود. در مدل تک جرمه از خاصیت فیزیکی محور توربین-ژنراتور صرف نظر می شود و کل مجموعه توربین-ژنراتور به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می شود. مدل تک-جرمه دینامیک و رفتار توربین-ژنراتور را به درستی بیان نمی کند. مطالعات نشان داده که مدل دو جرمه با دقت خوبی رفتار دینامیک های مکانیکی را مدل کرده و پاسخ آن اختلاف کمی با مدل های مرتبه بالاتر دارد. این شیوه مدل سازی می تواند در مطالعه نوساناتی با فرکانس مد پیچشی در ولتاژ، جریان و توان ژنراتور بکار می رود. مدل مکانیکی دو جرمه توربین-ژنراتور در شکل (۵) نشان داده شده است. با ارجاع پارامترهای سمت توربین به سمت ژنراتور مدل سیستم مکانیکی به صورت شکل (۶) خواهد شد.



شکل ۵- مدل دو جرمه سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور



شکل ۶- مدل دو جرمه ارجاع یافته سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور

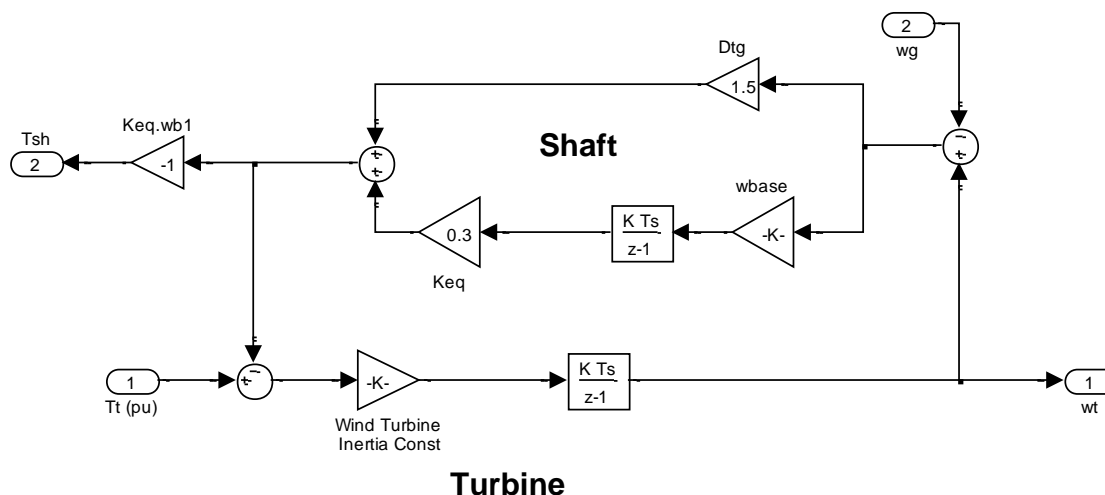
معادلات پریونیتی حاکم بر سیستم ارائه شده در شکل (۶) به صورت رابطه های (۵) تا (۷) می باشند [10].

$$2H_g \frac{d\bar{\omega}_g}{dt} = \bar{K}_{eq}\theta + \bar{D}_{tg}(\bar{\omega}_t - \bar{\omega}_g) - |\bar{T}_e| \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_b(\bar{\omega}_t - \bar{\omega}_g) \quad (6)$$

$$2H_t \frac{d\bar{\omega}_t}{dt} = \bar{T}_t - \bar{K}_{eq}\theta + \bar{D}_{tg}(\bar{\omega}_t - \bar{\omega}_g) \quad (7)$$

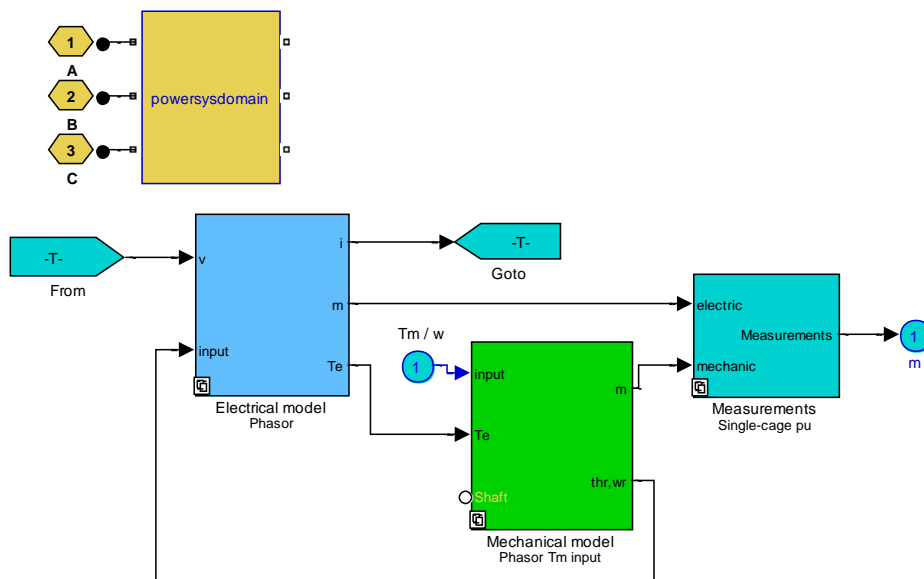
θ زاویه دوران محور توربین-ژنراتور، \bar{D}_{tg} میرایی معادل محور توربین-ژنراتور و \bar{K}_{eq} ثابت فنری محور توربین-ژنراتور می باشد. ω_b سرعت مکانیکی مبنا، H_t ثابت اینرسی توربین، H_g ثابت اینرسی ژنراتور، \bar{T}_t گشتاور توربین و \bar{T}_e گشتاور ژنراتور می باشد. مدل دو جرمه سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور بر مبنای روابط (۵) تا (۷) در شکل (۷) آورده شده است.



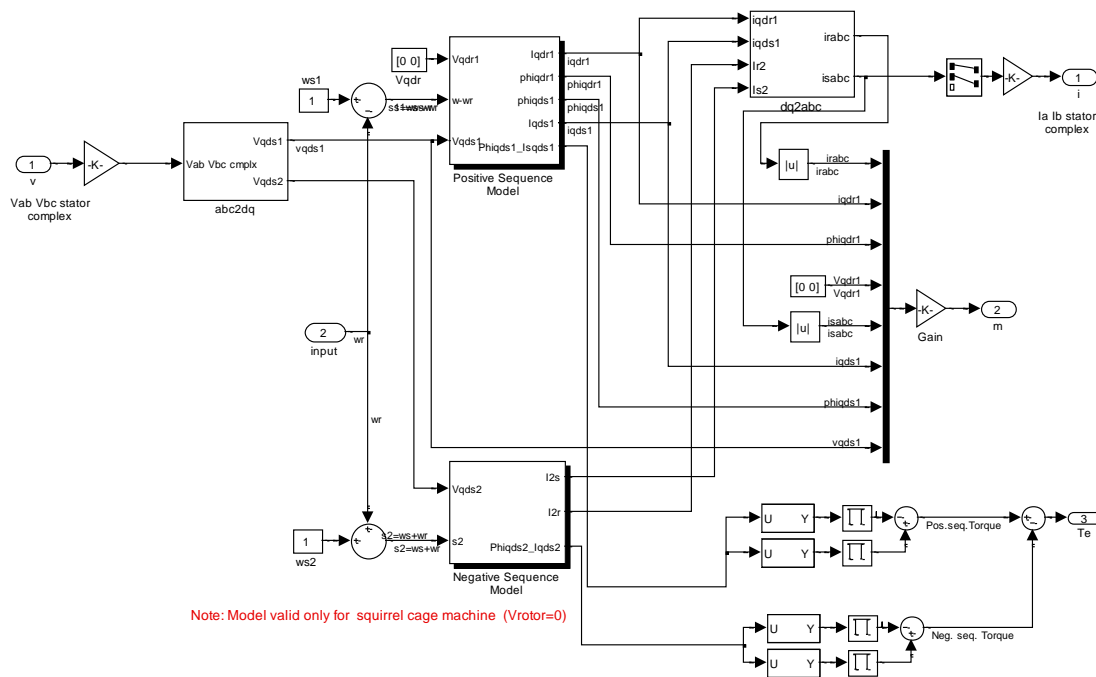
شکل ۷- مدل دو جرمه سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور

۷. مدل سازی ژنراتور القایی

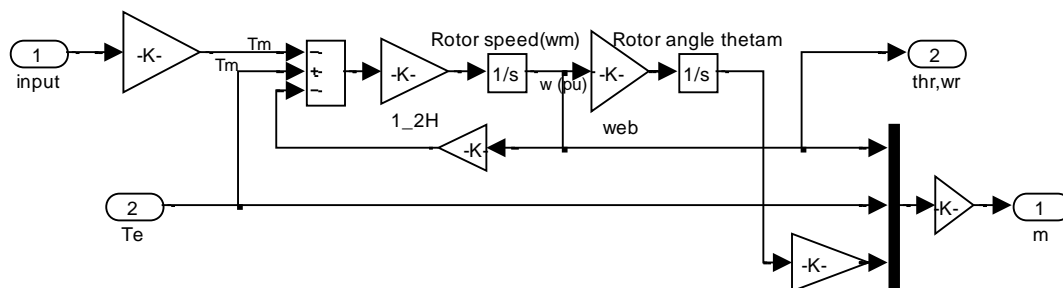
مدل ژنراتور القایی در شکل (۸) نشان داده شده است. مدل الکتریکی (بلوک Electrical model phasor) و مدل مکانیکی (بلوک Mechanical model phasor) به ترتیب در شکل های (۹) و (۱۰) نشان داده شده اند.



شکل ۸- مدل ژنراتور القایی قفسه‌ای



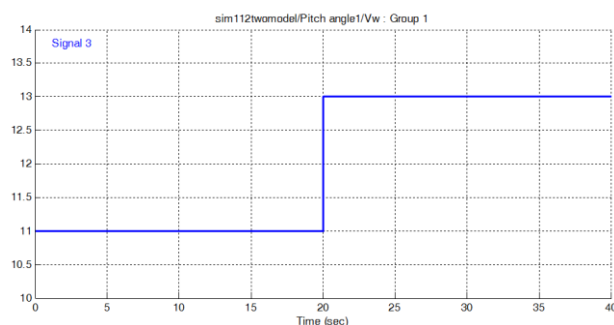
شکل ۹- مدل الکتریکی ژنراتور القایی قفسه‌ای



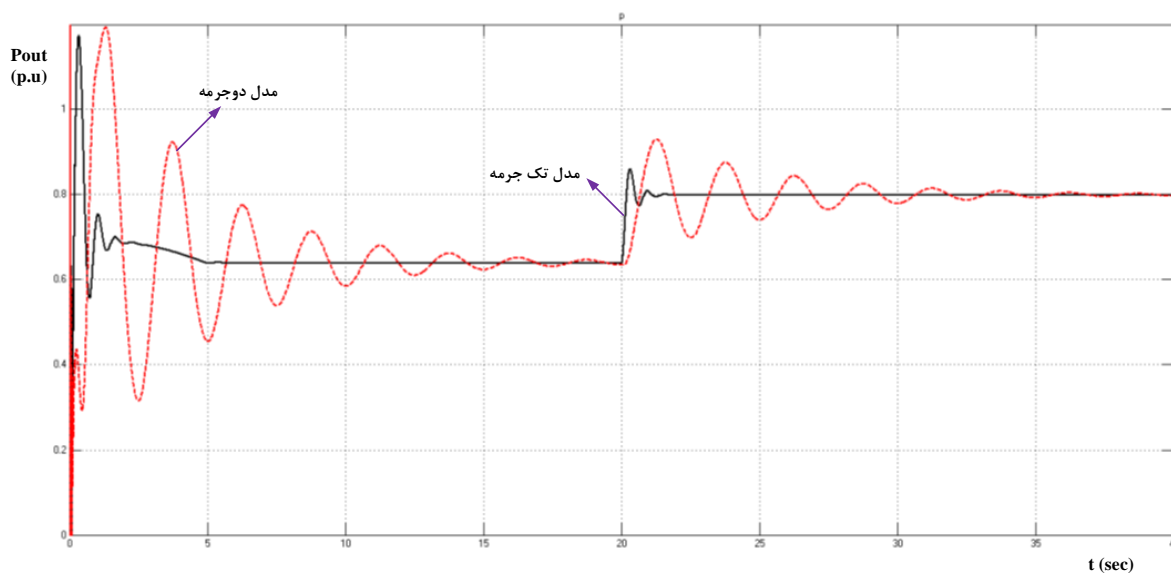
شکل ۱۰- مدل مکانیکی ژنراتور

۸. شبیه سازی سیستم

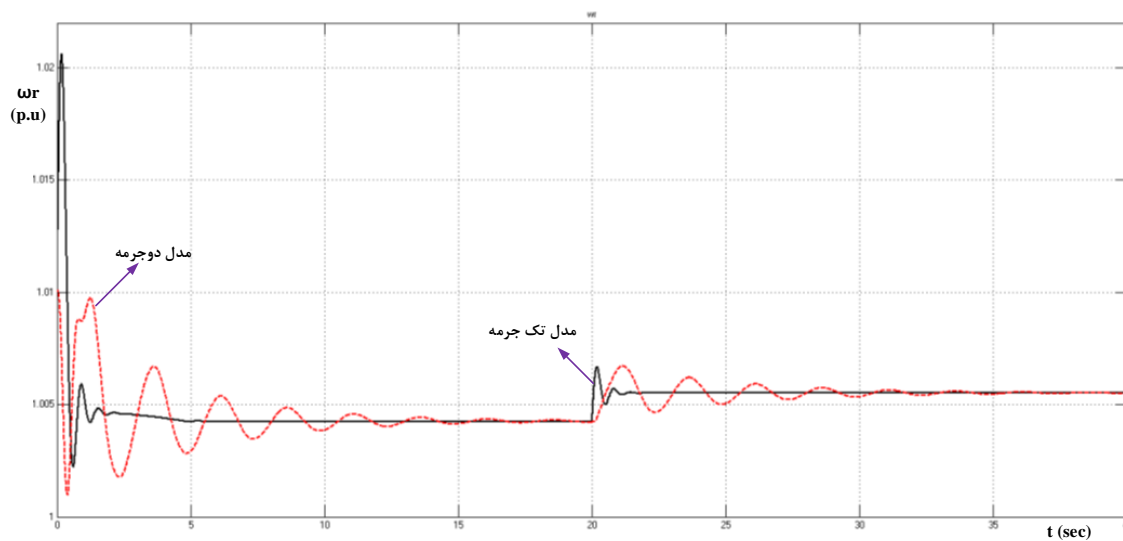
در این بخش سیستم را در شرایطی که سرعت باد از ۱۱ متر بر ثانیه به ۱۳ متر بر ثانیه تغییر کند، شبیه سازی می کنیم. سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور یکبار به صورت تک جرمه (صلب) و یکبار به صورت دوجرمه مدلسازی شده است. نتایج حاصل از مقایسه مدلسازی تک جرمه و دوجرمه در توان خروجی ژنراتور، سرعت ژنراتور، گشتاور الکتریکی ژنراتور و توان مکانیکی به ترتیب در شکل های (۱۲) تا (۱۵) ارائه شده است. مدت زمان شبیه سازی ۴۰ ثانیه است که سرعت با در ثانیه ۲۰ تغییر می کند. نحوه تغییر سرعت باد در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



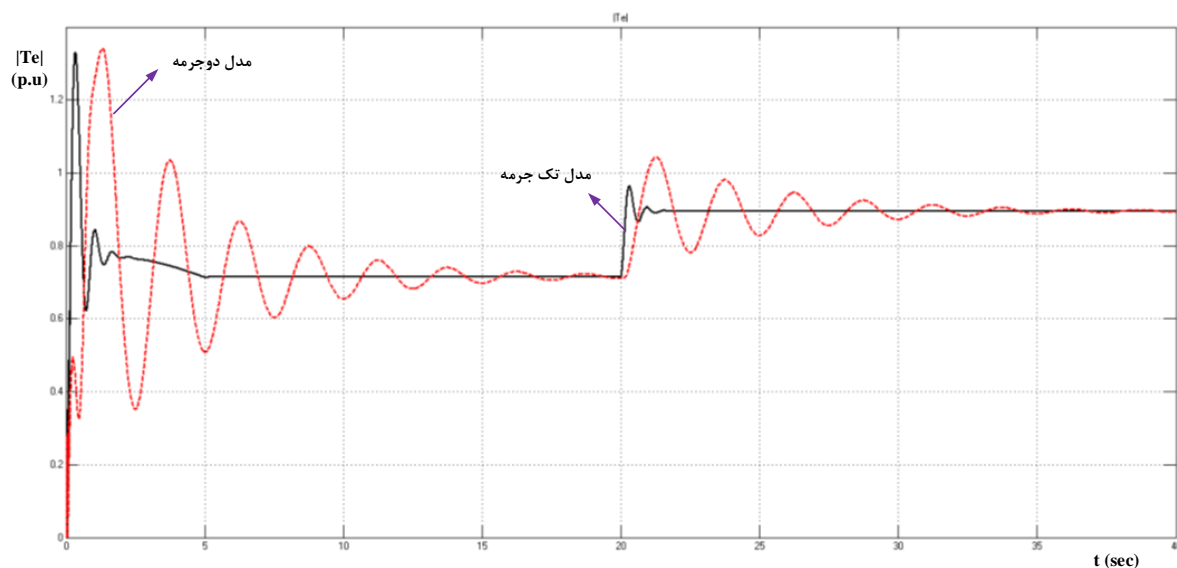
شکل ۱۱- سرعت باد در طول مدت شبیه سازی



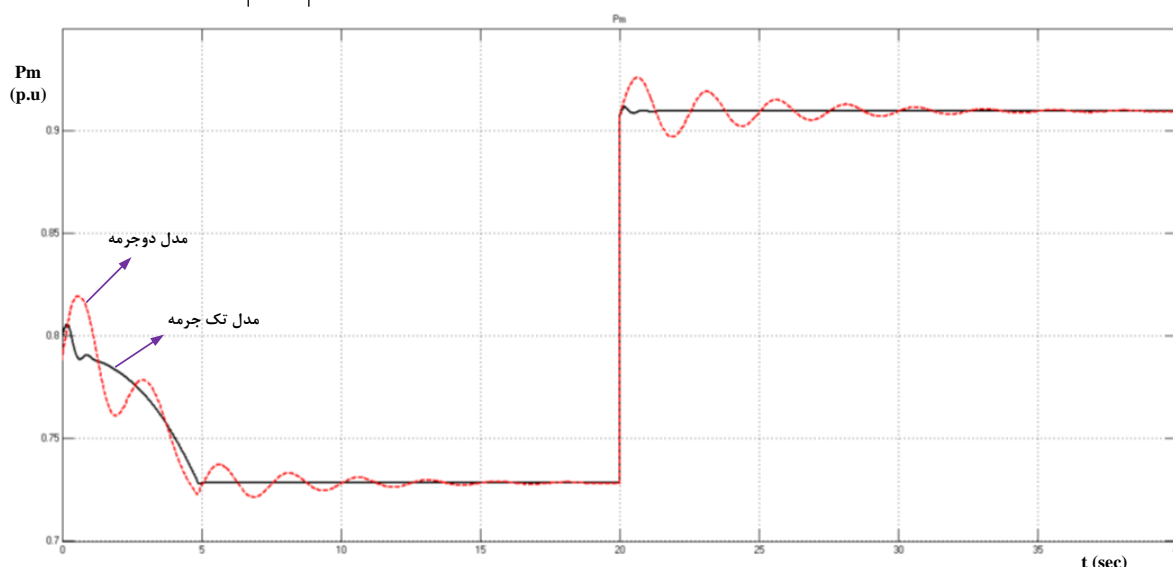
شکل ۱۲- شکل موج توان خروجی ژنراتور بر حسب پریونیت ($P_{out}^{p.u}$) با تغییر سرعت باد



شکل ۱۳- شکل موج سرعت ژنراتور بر حسب پریونیت با تغییر سرعت باد



شکل ۱۴- شکل موج قدر مطلق گشتاور الکتریکی ژنراتور بر حسب پریونیت ($|T_e^{p.u}|$) با تغییر سرعت باد



شکل ۱۵- شکل موج توان مکانیکی حسب پریونیت با تغییر سرعت باد

همان‌طور که در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) مشاهده می‌شود، مدل‌سازی سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور به صورت دو-جرمه در مقایسه با مدل‌سازی تک‌جرمه به خوبی رفتار دینامیکی سیستم را در برابر اغتشاشات نشان می‌دهد.

۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک توربین-ژنراتور بادی سرعت ثابت متصل به شبکه ۲۰ کیلو ولت مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردید. بر مبنای نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سیستم، مشاهده گردید که مدل‌سازی سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور به صورت تک‌جرمه رفتار دینامیکی سیستم را در حالت گذرا به خوبی مدل نمی‌کند. از طرفی مشاهده گردید که مدل‌سازی سیستم

مکانیکی توربین-ژنراتور به صورت دو جرمه به خوبی دینامیک سیستم را در حالت گذرا مدل می کند. این شیوه مدلسازی می تواند در مطالعه نوساناتی با فرکانس مد پیچشی در ولتاژ، جریان و توان ژنراتور بکار می رود.

۱۰. مراجع

- [1] A. Albers, O&M cost modelling, technical losses and associated uncertainties, the proceedings of EWEC, Parc Chanot, Marseille, France, March 2009.
- [2] Hofmann, Matthias, A Review of Decision Support Models for Offshore Wind Farms with an Emphasis on Operation and Maintenance Strategies, Wind Engineering 35.1, 2011.
- [3] Frede Blaabjerg and Ke Ma, Future on power electronics for wind turbine systems, IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, vol. 1, no. 3, September 2013.
- [4] N. Rosmin, S.J. Watson, A.H. Musta'amal, stall-regulated variable-speed wind turbine simulink model, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOC02013), Langkawi, Malaysia, June 2013.
- [5] Jason M. Kennedy, Brendan Fox, Tim Littler and Damian Flynn, validation of fixed speed induction generator models for inertial response using wind farm measurements, IEEE transactions on power systems, vol. 26, no. 3, august 2011.
- [6] S. Jaikhan and A. Kunakorn, time domain models for fixed-speed induction generators, proceedings of ECTI-CON 2008.
- [7] Tao Sun, Zhe Chen and Frede Blaabjerg, flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators, IEEE transactions on energy conversion, vol. 20, no. 4 december 2005.
- [8] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, wind energy generation modelling and control, John Wiley and Sons, Ltd, 2009.
- [9] Thomas Ackermann, wind power in power systems control, John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [10] Gonzalo Abad, Jesu 'sLo 'pez, Miguel A. Rodr 'iguez, Luis Marroyo, doubly fed induction machine modeling and control for wind energy generation, John Wiley and Sons, Ltd, 2011.
- [11] MathWorks' SimElectronics® User's Guide.