



# اولین کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران

The First Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation  
ICREDG 2010



## مدلسازی نیروگاه بادی با استفاده از مدل غیر خطی وینر

یزدان نجفی صارم، محمد حسین امراللهی، شکوفه مونسیراد و محمود عباسی

استفاده از نیروگاههای بادی بزرگ، هنوز سهم استفاده از این نوع تولید در مقابل نیروگاه های سوخت فسیلی، هسته ای و آبی کم بوده و رشد قابل توجهی برای این نوع نیروگاهها قابل تصور است [2]. در سایت نیروگاه های بادی اکثراً ماشینهای القایی صورت ژنراتور استفاده می شوند. از آنجاییکه ژنراتور های القایی مثل ژنراتورهای سنکرون با مساله پایداری روبرو هستند مهم است که مسایل پایداری اتصال آنها به شبکه نیز ارزیابی گردد [3]. اکثر توربینهای بادی متصل به شبکه از توربینهای سرعت ثابت استفاده می کنند ولی با این حال علاقه به استفاده از توربینهای بادی سرعت متغیر توسط سازنده های مختلف در حال اقتصادی شدن می باشد. مزیت سیستم های سرعت متغیر توان خروجی بالا و رگوله شده است و نیز کیفیت توان بالایی را هم تحویل می دهد [4]. امروزه ژنراتور های توربینهای بادی از هر دو نوع ژنراتور سنکرون و آسنکرون بهره می گیرند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند [5]. در حال حاضر در بین منابع انرژی تجدیدپذیر سیستمهای بادی توجه اقتصادی بیشتری نسبت به دیگر منابع تجدیدپذیر دارند [1]. سیستم های بادی سرعت متغیر 20 الی 30 درصد انرژی بیشتر نسبت به سیستم های توان ثابت تحویل می دهند. در ضمن باعث کاهش نوسان توان و بهبود عرضه توان راکتیو می شوند برای دستیابی به ماکزیمم توان در سرعت های مختلف باد، بایستی سرعت توربین در محدوده وسیعی قابل تغییر باشد. انتخاب نوع ژنراتور به عوامل مختلفی از جمله نوع عملکرد، مشخصات ماشین، نگهداری و قیمت بستگی دارد. دستیابی به ماکزیمم توان در صورت اتصال مستقیم ژنراتور القایی به شبکه در فرکانس ولتاژ ثابت امکانپذیر نمیباشد. زیرا ژنراتور القایی در صورت اتصال مستقیم به شبکه امکان تغییرات جزئی سرعت بین سرعت متناسب با گشتاور ماکزیمم و سرعت سنکرون را خواهد داشت. ژنراتور القایی تغذیه دابل نیز با وجود کاربرد وسیع در سیستم های بادی، توانایی کار در محدوده وسیع تغییرات سرعت روتور را ندارند. ژنراتورهای سنکرون مغناطیس

چکیده - انرژی باد برای تولید برق در جهان نسبت به دیگر منابع تولید انرژی الکتریکی از شتاب و رشد بی سابقه ای در سالهای اخیر برخوردار بوده است. از آنجاییکه که مناطق با پتانسیل انرژی باد لزوماً در نزدیکی مراکز مصرف نمی باشند، بررسی، مدل سازی و تحلیل مزارع بادی از نظر تغییرات پارامتر های الکتریکی و مکانیکی از جنبه های مختلف حائز اهمیت است. عموماً واحدهای بادی از طریق شبکه های شعاعی و محلی به سیستم پیوسته برق متصل می باشند و در صورتی که فاصله مراکز مصرف انرژی از واحد های فوق دور باشند امکان انتقال توان تولیدی با مشکل مواجه خواهد بود. لذا بمنظور حفظ پایداری و ایجاد شرایط انتقال تولید برق به مراکز مصرف همواره مدل مناسبی از این سیستم مورد نیاز است. در این مقاله یک سیستم نیروگاه بادی مدلسازی گردیده است. برای مدلسازی ژنراتور از روش جدیدی با استفاده از مدل غیر خطی وینر مبتنی بر شبکه عصبی استفاده شده است.

واژه های کلیدی - مدلسازی غیرخطی، نیروگاه بادی، ژنراتور سنکرون و شبکه عصبی

### 1- مقدمه

امروزه انرژی های نو بالاخص نیروگاههای بادی بر اساس تجربه کارآمد بودنشان بعنوان زمینه جدید مطرح می شوند و هر روزه خصوصاً در کشورهای اروپایی در حال گسترش هستند. از اینرو مطالعه و بررسی اثرات دینامیکی آنها روی سیستم قدرت برای انتقال توان الکتریکی اجتناب ناپذیر می نماید [1]. مهمترین مزیت های برق تولیدی از انرژی های نو عدم انتشار ذرات سمی و نامحدود بودن منابع استفاده شده بعنوان نیروی محرکه اولیه می باشد. یکی از راههای تولید انرژی الکتریسیته استفاده از توربینهای بادی برای تبدیل انرژی جنبشی باد به برق است. با این حال و با وجود رشد

یزدان نجفی صارم، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، کدپستی 93187-57166  
(email: yazdan.najafi@gmail.com)

محمد حسین امراللهی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه کدپستی 93187-57166  
(email: amrollahi\_mh@yahoo.com)

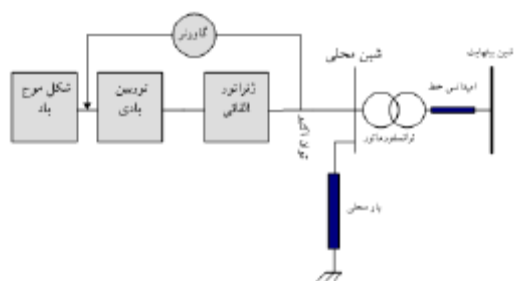
شکوفه مونسیراد، دانشجوی دکتری مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران (email: sh.mounesirad@gmail.com)

محمود عباسی، کارشناسی ارشد مهندسی برق، ارومیه  
(email: mahmood.abbasi@iaurmia.ac.ir)

الکترونیک قدرت به شبکه متصل می شوند و کنترل زاویه گاه پره توربین ها اجازه رگوله سازی توان ورودی به ژنراتور را می دهد که با مدل زاویه گام پره کنترل می شود و امکان عملکرد بهتر در توان نامی خود و دریافت بالاترین توان ممکنه از انرژی قابل حصول باد را فراهم می سازد.

مدل نیروگاه بادی که با سرعت باد متغیر با زمان کار می کند از اجزا زیر تشکیل شده است:

- ۱- مدل باد
  - ۲- مدل توربین بادی و ژنراتور القایی
  - ۳- مدل بانک خازنی
  - ۴- مدل خط انتقال
- شکل مدل مذکور در شکل (۲) آورده شده است.



شکل 2: مدل یک توربین بادی که به شین بینهایت متصل است.

### 3- مدلسازی باد

یک تقریب برای مدلسازی سرعت باد، اندازه گیری است. مزیت این روش آن است که سرعت واقعی باد برای شبیه سازی استفاده می شود و عیب آن استفاده از سرعت باد

اندازه گیری شده قبلی در شبیه سازی است. یک تقریب انعطاف پذیر استفاده از مدلی برای سرعت باد است که بتواند سرعت باد را، با توجه به ویژگی های که توسط کاربر اعمال می شود ایجاد کند. در بسیاری از مقالات سرعت باد معمولاً به وسیله چهار مقدار زیر شبیه سازی می شود.

مدل مورد استفاده برای این مقاله از چهار مؤلفه تشکیل شده است [2] و به صورت زیر قابل توصیف است:

$$V_{WIND} = V_{BASE} + V_{GUST} + V_{RAMP} + V_{NOISE} \quad (1)$$

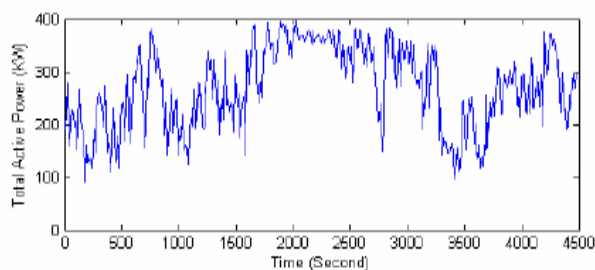
که  $V_{BASE}$  مؤلفه اصلی،  $V_{GUST}$  مؤلفه تندباد یا باد ناگهانی،  $V_{RAMP}$  مؤلفه شیب دار و  $V_{NOISE}$  مؤلفه نویزدار می باشد. مؤلفه اصلی یک سرعت ثابت است. مؤلفه تندباد می تواند به صورت تابع سینوسی یا کسینوسی بیان شود که به صورت ترکیبی از توابع سینوسی مختلف در نظر گرفته شود. مؤلفه نویز سرعت باد به صورت تابع مثلثی تعریف می شود که فرکانس و اندازه آن قابل تنظیم است.

دائم (PMSG) نیز برای بهره برداری در توان های بالا بسیار گران می باشد. ماشین های القایی قفس سنجابی به دلیل قیمت پایین، مقاوم بودن و سهولت نگهداری به وفور در صنعت به کار می روند. همین مزایا این ماشین را به عنوان گزینه ای مناسب برای استفاده در سیستم های بادی سرعت متغیر مطرح می کند [3]. در این مقاله یک نیروگاه بادی مدلسازی شده است. در ابتدا مدلی خطی برای باد ارائه گردیده است و سپس توربین و ژنراتور سنکرون مدلسازی گردیده است. عمده کار مقاله ارائه مدل غیرخطی برای ژنراتور سنکرون می باشد.

### 2- مدلسازی نیروگاه های بادی

در بسیاری از مطالعاتی که انجام گرفته از مدل مجتمع برای شبیه سازی نیروگاهها و سایت های بادی استفاده می شود. چون معمولاً توربین های بادی بصورت مجتمع و مشابه هم هستند و در یک نقطه به شبکه متصل می شوند، اساساً دارای عملکرد مشابهی اند که در [1] و [6] در این مورد مدل ها و روابط ریاضی ارائه شده است.

در مورد کاربرد نیروگاه بادی بزرگ با تعداد زیادی توربین بادی، مدل مجتمع توان خروجی از دقت کافی برخوردار نیست زیرا توان خروجی توربین بادی که از ژنراتور القایی و کنترل پسینو استال استفاده می کنند به شدت وابسته به تغییرات سرعت باد است. برای مثال تغییرات توان خروجی یک توربین 300 kW که در نیروگاه والفجر مونیتور شده است مطابق شکل 1 است که در مدت زمان 4500 ثانیه اندازه گیری شده و نشان دهنده وابستگی شدید توان خروجی به سرعت باد است که ماهیتاً مقدار تصادفی و غیر قابل پیش بینی داشته و متاثر از شرایط محیطی و جوی است، و برخلاف سایر نیروگاهها مانند سوخت فسیلی، کنترل توان توربین میسر نیست. همچنین سرعت لحظه ای باد در نقاط مختلف و برای توربین های مختلف یک سایت که شامل توربین های متعدد و با فاصله زیاد از هم و برای ارتفاعات مختلف، مقدار متفاوتی را داراست که می تواند اختلاف زیادی را در بر داشته باشد.

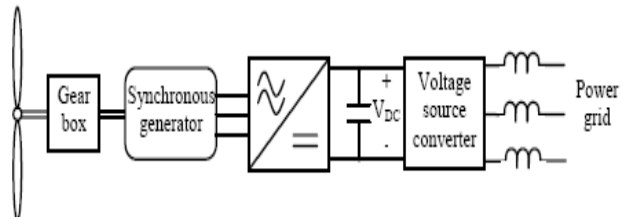


شکل 1: توان خروجی یک توربین 300 kW در نیروگاه والفجر منجیل

البته امروزه از تکنولوژی دیگری با مفهوم توربین های سرعت متغیر استفاده می کنند. در این روش توربین ها با استفاده از مبدل های

4- مدل توربین بادی و روابط دینامیکی

اجزاء یک توربین همانطور که در شکل (3) نشان داده شده از پنج قسمت اصلی: ژنراتور، گیربکس، پره، شفت اصلی و شفت متصل به ژنراتور تشکیل شده است.



شکل 3: مدل توربین بادی سرعت متغیر متصل به ژنراتور سنکرون

توان مکانیکی خروجی یک توربین بادی توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی هوا،  $A$  مساحتی است که جریان هوا عمود بر پره های توربین جاروب می کند،  $C_p$  ضریب توان آیرودینامیکی توربین و  $V_w$  سرعت باد می باشد.  $C_p$  تابعی از سرعت باد، سرعت زاویه ای چرخش پره های روتور و پارامترهای متناسب با پره های روتور می باشد. مقدار تقریبی ضریب توان آیرودینامیکی از رابطه زیر بدست می آید [7].

$$C_p = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{I} - 0.022 b^2 - 5.6 \right) e^{-\frac{17R}{I}} \quad (3)$$

که در آن  $I$  (نرخ سرعت نوک) عبارت است از:

$$I = \frac{w_T R}{V_w} \quad (4)$$

در روابط فوق،  $w_T$  و  $b$  بترتیب سرعت زاویه ای چرخش پره های روتور و زاویه انحراف پره های توربین (Pitch Angle) می باشند. کنترل توان خروجی توربین تابعی از زاویه انحراف پره ها خواهد بود، بدین نحو که با کنترل زاویه فوق در یک محدوده مشخص می توان توان خروجی توربین را کنترل نمود.

گشتاور مکانیکی حاصله از رابطه فوق به عنوان گشتاور ورودی به ژنراتور بادی اعمال شده و ژنراتور را می چرخاند. فاکتور تبدیل توان  $C_p$  به صورت حتابعی از نسبت سرعت نوک  $I$  قابل بیان است.

شکل (5) نمودار تغییرات  $C_p$  نسبت به  $I$  به ازای مقادیر مختلف  $b$  می باشد. توان خروجی توربین بادی از روی منحنی توان خروجی قابل محاسبه میباشد این منحنی در شکل (5) نشان داده شده است [8]

می شود.  $V_{co}$  نیز سرعت قطع می باشد که در این سرعت به دلایل حفاظتی توربین از مدار خارج می شود. همانطور که در شکل (4) مشخص است رابطه بین توان خروجی و سرعت باد یک رابطه غیرخطی می باشد که در رابطه زیر ارائه شده است:

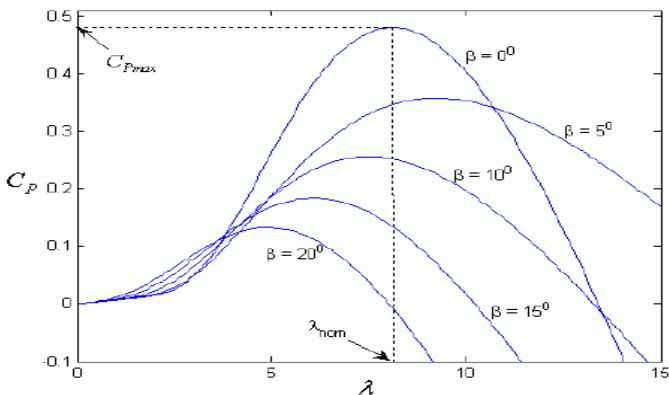
$$P(SW) = \begin{cases} 0 & 0 \leq SW < V_{ci} \\ P_r(A + B \times SW + C \times SW^2) & V_{ci} \leq SW < V_r \\ P & V_r \leq SW < V_{co} \\ 0 & SW > V_{co} \end{cases} \quad (5)$$

در این رابطه مقادیر  $C, B, A$  مقادیر ثابتی هستند؛ این پارمترها با توجه به  $V_{co}$  و  $V_r$  از روابط زیر قابل محاسبه می باشند [9].

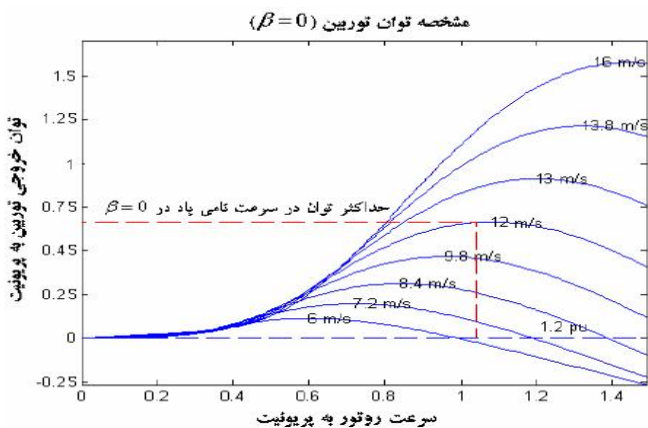
$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ V_{ci}(V_{ci} - V_r) - 4V_{ci}V_r \left[ \frac{(V_{ci} + V_r)}{2V_r} \right]^3 \right\}$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ 4(V_{ci} + V_r)V_r \left[ \frac{(V_{ci} + V_r)}{2V_r} \right]^3 - (3V_{ci} + V_r) \right\} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left\{ 2 - 4 \left[ \frac{(V_{ci} + V_r)}{2V_r} \right]^3 \right\}$$



شکل 4: نمودار تغییرات  $C_p$  نسبت به  $I$  به ازای مقادیر مختلف  $b$



شکل 5: منحنی توان توربین بر حسب سرعت رتور در سرعت های مختلف باد

5- مدل سازی ژنراتور سنکرون

در این مقاله برای مدل سازی غیرخطی ژنراتور سنکرون از یک مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی استفاده شده است. قسمت خطی مدل مورد نظر از یک مدل فضای حالت با قابلیت ویژه در پوشش دینامیک های سیستم تشکیل شده است، در حالی که قسمت

محاسبه می‌شود. با استفاده از این دنباله، یافتن تقریب اولیه از قسمت غیرخطی مدل وینر تنها مدلسازی غیرخطی استاتیکی و مساله تخمین می‌باشد. این قسمت غیرخطی در حال حاضر با استفاده از شبکه عصبی تک لایه که بصورت زیر بیان می‌شود مدل سازی شده است:

$$f_s(z(k)) = \sum_{i=1}^n \left( a(s,i) f \left( \sum_{j=1}^l b(s,i,j) z_j(k) + b(s,i) \right) \right) + b(s,u+1) + e_s(k) \quad (8)$$

در این رابطه نماد  $f_s(\cdot)$  و  $z_s(k)$  به ترتیب برای مشخص کردن  $s$  امین تابع برداری  $f(\cdot)$  و بردار  $z(k)$  بکار می‌رود. بعلاوه، ضرایب  $a(s,i)$ ،  $b(s,i,j)$ ،  $b(s,i)$  و  $b(s,u+1)$  اعداد حقیقی هستند که باید تخمین زده شوند و عدد صحیح  $u$  بیانگر تعداد سلولها می‌باشد. کمیت  $e(k)$  خطای تقریب می‌باشد. با در نظر گرفتن ابعاد بردارهای  $z(k)$ ، عدد صحیح  $s$  از 1 تا 1 تغییر می‌کند. ثوابت  $a(s,i)$ ،  $b(s,i,j)$ ،  $b(s,i)$  و  $b(s,u+1)$  در "A" در بردار پارامتر جمع شده و با استفاده از مساله حداقل مربعات  $\theta \in R^{l(l+2)u+1}$  غیرخطی زیر حل می‌شود:

$$\min_{\theta} \sum_{k=1}^N \left\| \begin{array}{l} y_1(k) - \sum_{i=1}^n \left( a(l,i) f \left( \sum_{j=1}^l b(l,i,j) \hat{z}_j(k) + b(l,i) \right) \right) + b(l,u+1) \\ y_2(k) - \sum_{i=1}^n \left( a(l,i) f \left( \sum_{j=1}^l b(l,i,j) \hat{z}_j(k) + b(l,i) \right) \right) + b(l,u+1) \end{array} \right\|^2 \quad (9)$$

در نهایت پارامترهای قسمت‌های خطی و غیرخطی توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی، شناسایی می‌شوند. روند کار به این صورت است که ماتریس‌های سیستم مربوط به گام اول و پارامترهای تخمین زده شده در بردار  $\theta$  مربوط به گام دوم بعنوان تخمین اولیه در محاسبه پارامترهای نهایی سیستم وینر پارامتری شده بکار می‌رود. علاوه بر پارامترهای ترم غیرخطی  $f(\cdot)$  که در گام دوم تعریف شد، پارامتری کردن نهایی سیستم وینر (6) نیازمند پارامتری کردن ماتریسهای  $(A, B, C, D)$  و مقدار اولیه بردار حالت  $x(1)$  در "V" می‌باشد. در اینجا ملاحظه می‌کنیم که جفت  $(A, C)$  بگونه‌ای پارامتریزه می‌شود که به اصطلاح به آن متعامد خروجی گفته می‌شود. در این نوع خاص از پارامتریزه کردن، ماتریسهای  $A$  و  $C$  به قسمی تعیین می‌شوند که گرامیان خروجی، ماتریسی یکه گردد.

تعریف - جفت  $(A, C)$  مربوط به مدل فضای حالت که با استفاده از چهارتایی ماتریسهای سیستم  $(A, B, C, D)$  به شکل متعامد خروجی است اگر زوج  $(A, C)$  شرط زیر را برآورده کند:

$$A^T A + C^T C = I_n \quad (10)$$

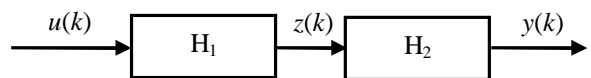
که در این رابطه  $I_n \in R^{n \times n}$  بیانگر ماتریس واحد مرتبه  $n$  می‌باشد. این تعریف بصورت صریحی بیان می‌کند که ماتریس سیستم  $A$  باید بصورت مجانبی پایدار باشد. برای اینکه توصیف فضای حالت یکتا باشد، ماتریسهای  $A$  و  $C$  را بگونه‌ای تبدیل می‌کنیم که  $\begin{bmatrix} C \\ A \end{bmatrix}$

غیرخطی یک شبکه عصبی با قابلیت تقریب عمومی می‌باشد. این ساختار در ابتدا با پارامتری کردن مدل و سپس بهینه‌سازی خطای پیش‌بینی مدل شناسایی می‌شود. داده‌های مورد نظر برای شناسایی با اعمال یک تست مناسب غیرخطی جمع‌آوری شده‌اند. ابتدا از یک ژنراتور شبیه‌سازی شده جمع‌آوری شده است. داده‌ها سپس با استفاده از تست وصل - خط از یک میکرو ژنراتور سنکرون جمع‌آوری شده است. مدل بدست‌آمده از روش شناسایی جعبه سیاه ژنراتور برای دو نقطه کار مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

## 6- شناسایی مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی

### 6-1- شناسایی مدل وینر

یک مدل وینر شامل بلوک دینامیکی خطی  $(H_1)$  و یک بلوک غیرخطی استاتیکی  $(H_2)$  است که بصورت سری در قسمت خروجی قرار دارد و در شکل 6 نشان داده شده است. در اینجا  $z(k)$  سیگنال میانی است که لزوماً معنای فیزیکی ندارد.



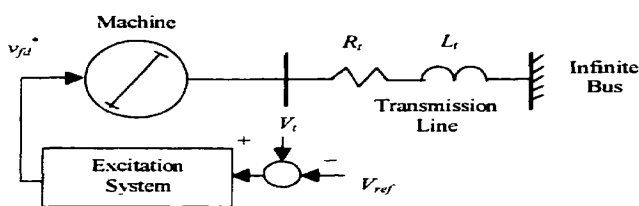
شکل 6: نمایش کلی یک مدل وینر

نمایش فضای حالت مدل وینر بصورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ z(k) &= Cx(k) + Du(k) \\ y(k) &= f(z(k)) + v(k) \end{aligned} \quad (7)$$

در این معادله  $x(k)$  بردار فضای حالت  $n$  بعدی در لحظه  $k$ ،  $u(k)$  بردار  $m$  بعدی ورودی کنترل،  $y(k)$  بردار پاسخ خروجی  $l$  بعدی و  $v(k)$  ترم اغتشاش تصادفی با میانگین صفر می‌باشد که از نظر آماری بازای کلیه  $k$  و  $t$ ها از  $u(t)$  مستقل می‌باشد. ماتریسهای سیستم  $A, B, C, D$  و ماتریسهای حقیقی با ابعاد مناسب می‌باشند و  $f(\cdot)$  تابع برداری غیرخطی مربعی از  $R^l$  به  $R^l$  می‌باشد. فرض کنید که دنباله داده‌های ورودی و خروجی زیر مربوط به سیستم (1) داده شده است. فرض کنید که دنباله ورودی  $\{u(k)\}$  به اندازه کافی دارای تحریک غنی باشد [10] و بصورت آماری از اغتشاش  $\{v(k)\}$  مستقل است. روش سیستماتیک برای شناسایی مساله بالا در [10] ذکر شده است. گام اول شناسایی قسمت خطی مدل با استفاده از روشهای فضای حالت می‌باشد. بنابراین در ابتدا دینامیکهای غیرخطی را که با چهارتایی  $(A, B, C, D)$  بیان می‌شود و با فرض اینکه ترم غیرخطی وجود ندارد (یک نگاشت واحد است) شناسایی می‌کنیم. در گام دوم با استفاده از چندتایی  $(A, B, C, D)$  که در گام اول شناسایی شد، دنباله  $\{\hat{z}(k)\}_{k=1}^N$  از این سیستم LTI

این مقاله، ساختار غیرخطی با اعمال اثر اشباع مغناطیسی برای ژنراتور سنکرون برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است. در این مدل شبیه سازی شده، از اثرات سیم پیچ های دمپر و دینامیک های استاتور، صرف نظر شده است. از این دو اثر می توان چشم پوشی کرد مخصوصاً زمانی که مطالعات نوسانات فرکانس پایین، مورد توجه باشد [12]. در این ساختار، ولتاژ تحریک ( $v_f$ ) و گشتاور مکانیکی ( $T_m$ )، ورودی های ژنراتور سنکرون، فرض می شود ولی از آنجایی که گشتاور مکانیکی به آسانی قابل اندازه گیری و کنترل نیست، معمولاً ولتاژ تحریک به عنوان ورودی اصلی سیستم برای شناسایی و کنترل در نظر گرفته می شود. در اینجا نیز، ولتاژ تحریک به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته شده است [12].



شکل ۷: مدل سیستم مورد بررسی

ژنراتور سنکرون متصل به خط انتقال بینهایت همانند شکل به عنوان سیستم مورد بررسی در نظر گرفته شده است. ساختار غیرخطی ارائه شده در [3و2] برای مدل سازی سیستم انتخاب شده است. این مدل به صورت زیر توصیف می شود:

$$\begin{aligned} v_d &= -r_a i_d + \dot{y}_d - \omega y_q \\ v_q &= -r_a i_q + \dot{y}_q - \omega y_d \\ v_f &= r_f i_f + y_f \\ 0 &= v_D = r_D i_D + \dot{y}_D \\ 0 &= v_Q = r_Q i_Q + \dot{y}_Q \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \omega y_d \\ \omega y_f \\ \omega y_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & x_{md} \\ x_{md} & x_f & x_{md} \\ x_{md} & x_{md} & x_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_f \\ i_D \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \omega y_q \\ \omega y_Q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_q & x_{mq} \\ x_{mq} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

و دینامیک های روتور به صورت زیر توصیف می شود:

$$\begin{aligned} \dot{d} &= w \\ \dot{w} &= \frac{1}{J}(T_m - T_e - D.w) \end{aligned} \quad (17)$$

در این روابط:  $T_e$  گشتاور الکتریکی که به طور معمول هنگامی که ماشین به یک خط انتقال بینهایت متصل است با قدرت الکتریکی

ماتریس پایین مثلثی با عناصر مثبت بر روی قطر باشد. بعد از اینکه ماتریسهای A و C به این شکل تبدیل شدند، پارامتری کردن با استفاده از  $nl$  پارامتر انجام می شود. جزئیات بیشتر در [11] بیان شده است. بعد از پارامتری کردن ماتریسهای سیستم که در بردار  $\theta_{on}$  ذخیره می شود، تخمین کلیه پارامترهای سیستم پارامتری شده وینر را می توان بصورت زیر فرمول بندی کرد:

$$\min_{x(1), \theta_{on}, \theta} \sum_{k=1}^N \|y(k) - \hat{y}(k, x(1), \theta_{on}, \theta)\|^2 \quad (11)$$

برای بدست آوردن پارامترهای کل سیستم لازم است که مساله حداقل مربعات بالا را حل نماییم. الگوریتمی که در اینجا استفاده شده الگوریتم لونبرگ مارکوارت می باشد که بصورت تکراری مینیمم محلی تابع هزینه غیرخطی را پیدا می کند. اگر  $\theta$  برداری شامل کلیه پارامترها باشد با تعریف  $e(\theta) = y - \hat{y}(\theta)$ ، که  $e(\theta)$  بردار خطای بین بردار هدف و بردار خروجی می باشد، می توان پارامترهای  $\theta$  را در هر مرحله تکرار به روز کرد. فرض کنید که مقادیر این پارامتر در تکرار  $n$ ام الگوریتم لونبرگ- مارکوارت با  $\theta(t)$  نشان داده شود، بنابراین این الگوریتم تکراری بصورت زیر بیان می شود:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \Delta \theta(t) \quad (12)$$

در رابطه اخیر  $\Delta \theta$  حل مجموعه ای از معادلات خطی می باشد.

$$(\mathbf{J}^T(t)\mathbf{J}(t) + m\mathbf{I})\Delta \theta = -\mathbf{J}^T e(\theta(t)) \quad (13)$$

که در این رابطه  $\mathbf{J}(t)$  ماتریس ژاکوبین شامل مشتقات جزئی زیر می باشد:

$$\mathbf{J}_{ij} := \frac{\partial \hat{y}_i(\theta(t))}{\partial \theta_j}, \quad i=1:N, j=1:\text{length}(\theta). \quad (14)$$

پارامتر تنظیم  $m \in (0, \infty)$  ضریب لونبرگ نامیده می شود و برای همگرایی الگوریتم ضروری می باشد. در این رابطه مشتقات  $\mathbf{J}$  نسبت به پارامترهای قسمت غیرخطی بصورت تحلیلی و نسبت به پارامترهای قسمت خطی با استفاده از روش تفاضل مستقیم محاسبه می شوند.

کلیه مراحل شناسایی در جعبه ابزار شناسایی مدل وینر SLICOT انجام می شود.

## 7- ژنراتور سنکرون

سیستم مورد بررسی در این مقاله، یک ژنراتور سنکرون است که از طریق خط انتقال به شبکه بینهایت متصل شده است. (شکل 7). بسته به دقت لازم برای بخش الکتریکی ژنراتور سنکرون، مدل های درجه 3، 1، 7، 5 و صفر در نظر گرفته می شوند. تفاوت عمده این مدل ها در دقت آنهاست، مدل دقیق تر، درجه بالاتری دارد [12]. در

$P_e$  برابر است (به این معنی که  $w \equiv w_0$ ). روابط مربوط به ماشین سنکرون در مراجع [13] آورده شده است.

## 8- نتایج پیاده سازی

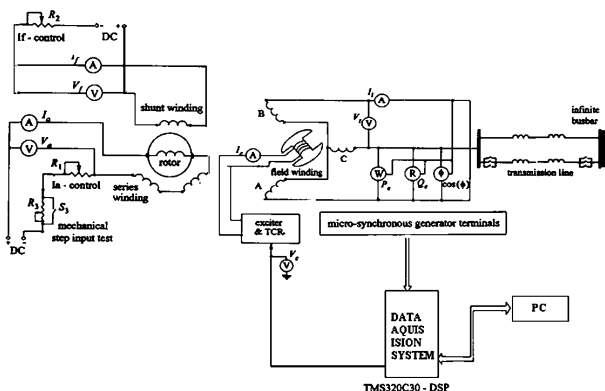
### 8-1- توصیف سیستم

سیستم مورد نظر عبارت است از یک میکرو ماشین  $3-phase, 60Hz, 208V, 3kVA$  که توسط یک موتور DC راه-اندازی شده است. میکرو ژنراتور می تواند دینامیک های ماشین های سنکرون بزرگتر را پوشش دهد هنگامی که پارامترها و متغیرها را به صورت پریونیت ارائه داده شود. مهمترین مسئله و تفاوت میکرو ماشین نسبت به ماشین های سنکرون بزرگتر تفاوت ثابت زمانی میدان می باشد. در این آزمایش برای اینکه میکرو ژنراتور رفتار ژنراتورهای بزرگتر را ارائه دهد و برای غلبه بر این تفاوت از تنظیم کننده ثابت زمانی که برای افزایش اثر ثابت زمانی میدان بکار می رود استفاده شده است [7]. زمان نمونه برداری 50 میلی ثانیه انتخاب شده است [8].

تجهیزات مورد استفاده در آزمایش در شکل 13 نشان داده شده است. ژنراتور توسط یک موتور DC راه اندازی شده است. سیگنال ورودی تحریک از طریق یک مبدل دیجیتال به آنالوگ به میدان ماشین اعمال شده است. ولتاژ میدان، ولتاژ ترمینال و توان الکتریکی توسط سیستم جمع آوری داده، اندازه گیری و نمونه برداری شده اند.

### 8-2- نتایج اعمال مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی بر میکرو ژنراتور

جهت اعمال روش شناسایی توصیف شده در فصل قبلی، بر روی میکرو ژنراتور توصیف شده فوق، در دو نقطه کار مختلف نمونه-برداری از داده های وصل-خط صورت پذیرفته است. در آزمایش اول سیگنال PRBS به میکرو ژنراتور اعمال شده است. نقطه کار اولیه سیستم با مشخصات  $v_f = 1.22 pu, Q = 0.18 pu, P = 0.636 pu$  در نظر گرفته شده است. در این آزمایش (نقطه کار اول) ولتاژ میدان از  $v_f = 1.30 pu$  تا  $v_f = 1.76$  به صورت پالس های تصادفی تغییر کرده است [7-8]. نتایج حاصل از انجام آزمایش و نتایج حاصل از شناسایی مدل توسط مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی در شکل های 9 تا 12 نشان داده شده است.



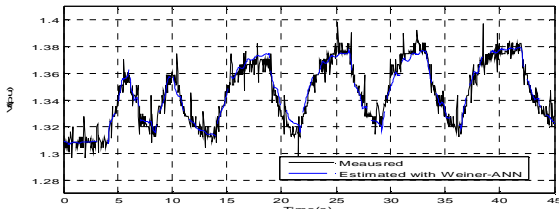
شکل 8: تجهیزات آزمایش بر روی میکرو ژنراتور [23]

سیگنال ولتاژ میدان ( $v_f$ ) در شکل 9 بر حسب پریونیت نشان داده شده است. با اعمال این ورودی و نمونه برداری از خروجی به صورت وصل-خط، سیگنال ولتاژ میدان به عنوان ورودی و سیگنال های ولتاژ ترمینال و توان الکتریکی به عنوان خروجی، به عنوان داده های شناسایی جعبه سیاه ژنراتور بکار رفته شده است. در شکل 10 سیگنال توان الکتریکی اندازه گیری شده (خروجی واقعی) و تخمین زده شده (خروجی مدل) با هم مقایسه شده اند. شکل 11 نیز به طور مشابه سیگنال ولتاژ ترمینال را نشان می دهد.

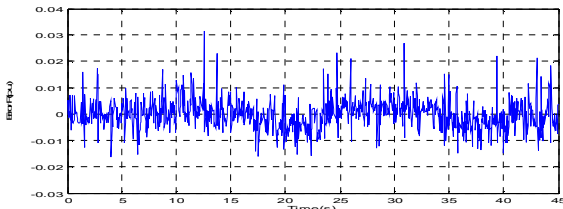
سیگنال های خطا در مرحله آموزش در شکل های 13 و 14 نشان داده شده است. مقادیر خطای نشان داده شده به ازای دو خروجی مقادیر قابل قبولی را ارائه داده است. مقادیر خطا بر حسب پریونیت به ازای هر دو خروجی کمتر از 3% می باشد.

در آزمایش دوم، سیگنال PRBS به میکرو ژنراتور اعمال شده است. نقطه کار اولیه سیستم به صورت زیر در نظر گرفته شده است. در این آزمایش ولتاژ میدان از  $v_f = 2.12 pu$  تا  $v_f = 2.82$  به صورت پالس های تصادفی تغییر کرده است. نتایج حاصل از انجام آزمایش و نتایج حاصل از شناسایی مدل توسط مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی در شکل های 15 تا 20 نشان داده شده است.

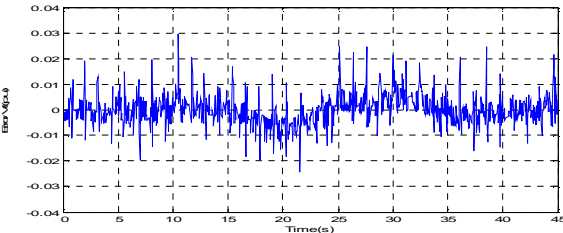
با اعمال ورودی و مقایسه خروجی های میکرو ژنراتور با مدل وینر غیرخطی شبکه آموزش داده شده است. سیگنال نشان داده شده در شکل 14 همزمان به ماشین سنکرون و مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی اعمال شده و خروجی های ناشی از ماشین سنکرون و مدل وینر مبتنی بر شبکه عصبی در شکل های 15 و 16 با هم در مرحله آموزش شبکه مقایسه شده اند. همچنین سیگنال های خطا در مرحله آموزش برای هر خروجی بر حسب زمان رسم شده است.



شکل 16: ولتاژ ترمینال پریونیت نقطه کار دوم آموزش - اندازه گیری شده (مشکی پیوسته) و تخمین زده شده (آبی منقطع)



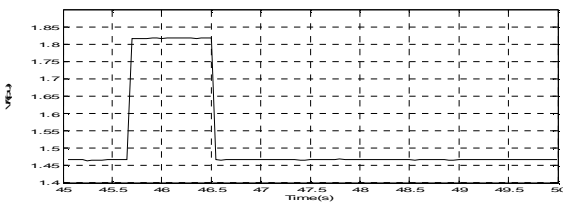
شکل 17: خطای تخمین آموزش خروجی توان اکتیو پریونیت نقطه کار دوم



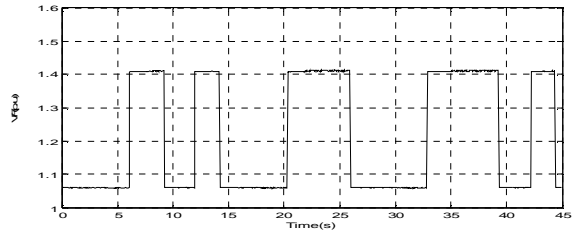
شکل 18: خطای تخمین آموزش خروجی ولتاژ ترمینال پریونیت در نقطه کار دوم

با توجه به میزان خطا و با در نظر گرفتن داده های عملی وصل-خط در حضور سیگنال های نویز، می توان نتیجه گیری نمود روش شناسایی از قابلیت بالایی برای مدل سازی ژنراتور برخوردار است برای ارزیابی توانایی روش، ورودی شکل 19 به عنوان ولتاژ تحریک شده به طور همزمان به میکرو ژنراتور و مدل شناسایی شده اعمال شده و نتایج خروجی های سیستم واقعی و مدل شناسایی شده در شکل های 20 و 21 بر حسب زمان رسم شده است.

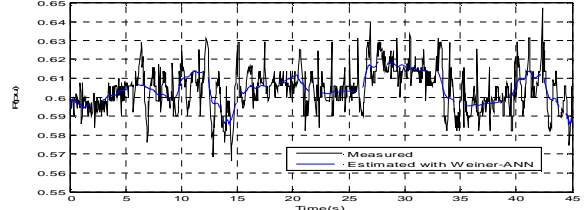
خروجی ژنراتور و مدل شناسایی شده به ازای ورودی یکسان، در شکل های 20 و 21 بر حسب زمان نشان داده شده است. نتایج مرحله ارزیابی نشان می دهد مدل شناسایی شده از توانایی قابل قبولی برای مدل سازی ژنراتور برخوردار است. سیگنال های خطای خروجی های میکرو ژنراتور واقعی و مدل شناسایی شده در مرحله ارزیابی در شکل های 21 و 22 آورده شده است. مشاهده می شود که میانگین خطای نسبی کمتر از 2 درصد به ازای هر دو خروجی است.



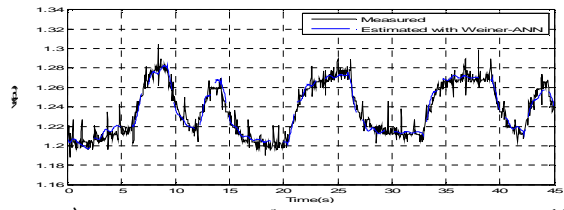
شکل 19: سیگنال ولتاژ ورودی میدان پریونیت در مرحله ارزیابی نقطه کار دوم



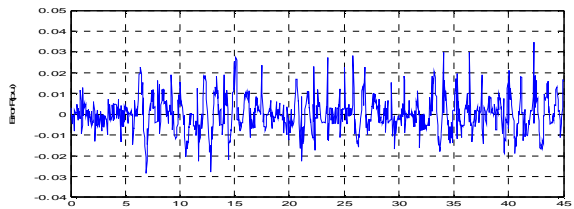
شکل 9: سیگنال ولتاژ ورودی میدان پریونیت در نقطه کار اول در مرحله آموزش



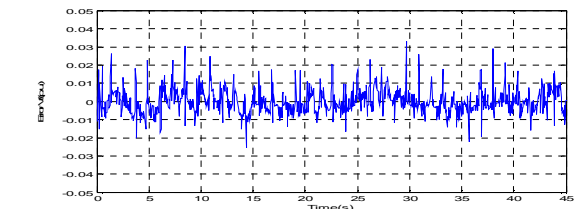
شکل 10: توان الکتریکی پریونیت نقطه کار اول آموزش - اندازه گیری شده (مشکی پیوسته) و تخمین زده شده (آبی منقطع)



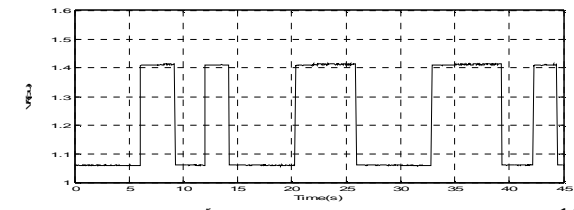
شکل 11: ولتاژ ترمینال پریونیت نقطه کار اول آموزش - اندازه گیری شده (مشکی پیوسته) و تخمین زده شده (آبی منقطع)



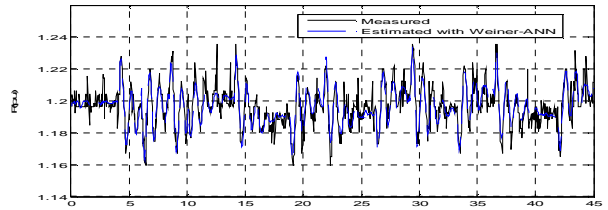
شکل 12: خطای تخمین آموزش به ازای خروجی توان اکتیو پریونیت نقطه کار اول



شکل 13: خطای تخمین آموزش خروجی ولتاژ ترمینال پریونیت در نقطه کار اول



شکل 14: سیگنال ولتاژ ورودی میدان پریونیت در مرحله آموزش نقطه کار دوم



شکل 15: توان الکتریکی پریونیت نقطه کار دوم آموزش - اندازه گیری شده (مشکی پیوسته) و تخمین زده شده (آبی منقطع)

غیرخطی وینر را نشان می دهد. شکل 24 سیگنال خطای ناشی از مدل های خطی و غیرخطی وینر به ازای ورودی تحریک شکل 19 را نشان می دهد. همچنین شکل 25 میانگین خطای دو مدل خطی و غیرخطی در مرحله ارزیابی را ارائه داده است. همانطور که از شکل پیداست خطای میانگین مدل غیرخطی حدود 8 برابر کوچکتر از مدل خطی است.

### ۹- مدل بانک خازنی

خازن های اصلاح ضریب توان گاهی بر روی باس بار اضافه می گردند و یا با ماشین القایی جهت فراهم کردن یک منبع توان راکتیو در ترمینال موتور یا ژنراتور، سوئیچ می شوند.

### ۱۰- مدل خط انتقال

با توجه به نحوه اتصال سیستم به خط انتقال (شکل 26) معادلات بیانگر ارتباط میان  $v_d$ ،  $v_q$ ،  $i_d$  و  $i_q$  به صورت زیر بدست می آیند:

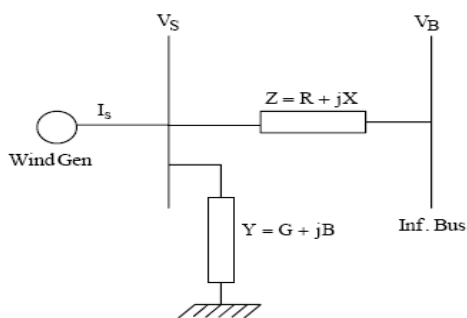
$$I = Y \times V + (V - V_B) / Z$$

$$i_D + j i_Q = (G + jB) \times (v_d + j v_q) + \quad (18)$$

$$(v_d + j v_q - v_{Bd} - j v_{Bq}) / (R + jX)$$

### 11- نتیجه گیری

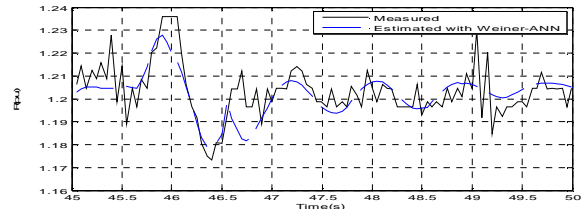
در سال های اخیر بهره گیری از انرژی باد برای تولید انرژی برق رشد قابل توجهی داشته است. بررسی شرایط انتقال و بهره گیری از انرژی فوق در شبکه های الکتریکی تابعی از توپولوژی سیستم و نحوه اتصال مزارع بادی به شبکه می باشند. مدلسازی نیروگاه های بادی می تواند در طراحی پارامترهای کنترلی و پیش بینی توان خروجی کمک شایانی کند. در مقاله نشان داده شد که روش ارائه شده برای مدلسازی غیرخطی ماشین سنکرون بسیار توانمند می باشد.



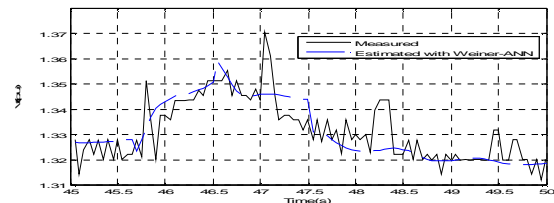
شکل 26: اتصال توربین بادی به شین بینهایت

### 12- مراجع

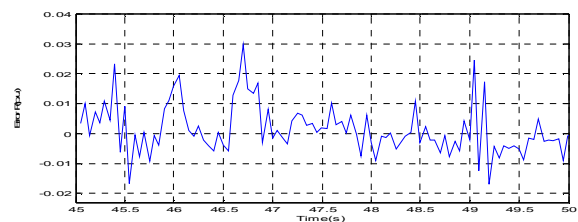
- [1] A.M. Karrari, W. Rosehart, O. P. Malik, "Nonlin earmodeling and simulation of a wind generation unit for transient and stability analysis", Technical Report University of Calgary, March 2003.
- [2] T. Thiringer, "Modeling of wind turbines for power system studies", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp.1132-1139, November 2002.



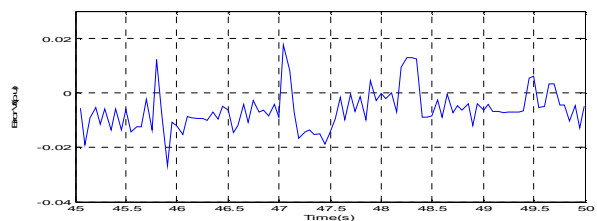
شکل 20: توان الکتریکی پروبیت نقطه کار دوم مرحله ارزیابی - اندازه گیری شده (مشکی پیوسته) و تخمین زده شده (آبی منقطع)



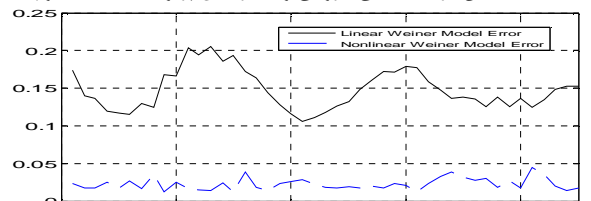
شکل 21: ولتاژ ترمینال پروبیت نقطه کار دوم مرحله ارزیابی - اندازه گیری شده (مشکی پیوسته) و تخمین زده شده (آبی منقطع)



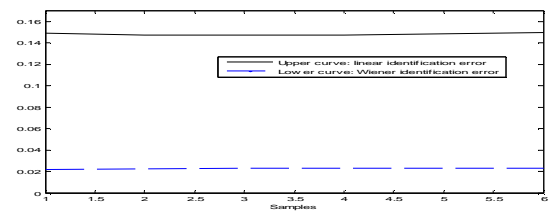
شکل 22: خطای تخمین مرحله ارزیابی خروجی توان اکتیو پروبیت نقطه کار دوم



شکل 23: خطای تخمین مرحله ارزیابی خروجی ولتاژ ترمینال پروبیت نقطه کار دوم



شکل 24: خطای تخمین وینر خطی و غیر خطی مرحله ارزیابی به خروجی ولتاژ ترمینال پروبیت نقطه کار دوم



شکل 25: میانگین خطای تخمین وینر خطی و غیرخطی مرحله ارزیابی خروجی ولتاژ ترمینال پروبیت نقطه کار دوم

برای پاسخ گویی به این سوال که آیا نمی توان به جای مدل غیرخطی وینر برای مدلسازی ژنراتور سنکرون از مدلی خطی که دارای پیچیدگی کمتری است استفاده کرد؟، شکل های 24 و 25 آورده شده است. شکل ها نتایج حاصل از ارزیابی مدل خطی و



- [3] L. Mihet-Popa, F. Blaabjerg and I. Boldea, "Wind turbine generating modeling and simulation where rotational speed is the controlled variable", IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 40, No. 1, pp. 3-10, January/February 2004.
- [4] Melgoza J., Jesus R., Heydt G.T, Keyhani A., "An Algebraic Approach for Identifying Operating Point Dependent Parameters of Synchronous Machine Using Orthogonal Series Expansions", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 16, No. 1, pp. 92-98, March 2001.
- [5] Melgoza J., Heydt G.T., Keyhani A., Agrawal B.L., Selin D., " Synchronous Machine Parameter Estimation Using Hartley Series", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 16, No. 1, pp. 49-54, March 2001.
- [6] Lai L.L., Ma J.T., "Application of Evolutionary Programming to Transient and Subtransient Parameter Estimation", IEEE Trans. On Energy Convers, Vol. 11, No. 3, pp. 523-530, 1996.
- [7] Karrari M., Menhaj M.B., "Application of Different Neural Networks for Identification of Power Systems", UKACC Conference on Control, University of Cambridge U.K. 4-7, September 2000.
- [8] Shamsollahi P., Malik O.P, "On-Line Identification of Synchronous Generator Using Neural Networks:, Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE 96, Part 2, pp. 595-598, 1996.
- [9] H. J. Vermeulen, J. M. Strauss and V. Shikoana, "Online Estimation of Synchronous Generator Parameters Using PRBS Perturbations", IEEE Transactions On Power Systems, VOL. 17, NO. 3, pp. 694-699, 2002.
- [10] M. Karrari and O.P. Malik, "Identification of Heffron-Phillips model parameters for synchronous generators using online measurements", IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 3, pp-313-320, 2004.
- [11] R. D. Fard, M. Karrari and O. P. Malik, "Synchronous Generator Model Identification for Control Application Using Volterra Series", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 20, No. 4, pp-852-858, 2005.
- [12] M. Verhaegen, "Identification of the temperature-product quality relationship in a multi-component distillation column," Chemical Engineering Communications, vol. 163, pp. 111-132, 1998.
- [13] B. Haverkamp, State Space Identification: Theory and Practice. Ph.D thesis, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2001.
- [14] P. Kundur, Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994.