



## ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) به روش آشوب و مشاهده‌ی اصلاح شده در سیستم تولید بادی (IP&O)

هادی آقازاده، حسین مددی کجابادی و احمد صادقی یزدان خواه

بودن توانایی کسب حداکثر توان از منبع انرژی باد می‌باشد. جهت کسب حداکثر توان از باد، بکارگیری سیستم ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) ضروری است. کنترل کننده‌ی MPPT، سرعت روتور توربین را طبق تغییرات سرعت باد به گونه‌ای تغییر می‌دهد که نسبت سرعت نوک پره (TSR) را در مقدار بهینه‌ی آن ثابت نگه دارد [3]. در کل، تکنیکهای مختلف ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم بادی، می‌توانند به چهار گروه با نامهای: کنترل نسبت سرعت نوک پره (TSR)، کنترل گشتاور بهینه (OT) [4, 5]، کنترل سیگنال توان [6, 7] و روش جستجوی آشوب و مشاهده (P&O) [7, 8] تقسیم شوند.

برای کنترل TSR استفاده از بادسنج گران قیمت، ضروری است. روش کنترل گشتاور بهینه، سعی در کنترل گشتاور ژنراتور جهت حداکثر کردن توان خروجی دارد. بطور مشابه، در کنترل سیگنال توان، با تعقیب منحنی توان بهینه، حداکثر توان خروجی حاصل می‌شود. در عمل سرعت باد بصورت لحظه‌ای تغییر می‌کند. بنابراین زمانیکه سرعت باد افزایش و یا کاهش پیدا می‌کند، اگر چنانچه سرعت روتور ژنراتور متناسب با آن تغییر نکند، توان کسب شده از باد به شدت کاهش خواهد یافت [9]. روش کنترل OT به دلیل هزینه‌ی بالای گشتاورسنج چندان مناسب برای پیاده‌سازی، بویژه در توربین‌های توان پایین نمی‌باشد. روش کنترل P&O دارای مزیت سادگی و انعطاف‌پذیری بالا می‌باشد، اما در اطراف نقطه‌ی حداکثر توان نوسان می‌کند که این امر راندمان سیستم بادی را کاهش می‌دهد. در این مقاله، الگوریتم ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) به روش آشوب و مشاهده‌ی اصلاح شده (IP&O) ارائه می‌گردد. در این روش جهت بهبود عملکرد MPPT و نیز افزایش سرعت همگرایی و دقت سیستم، از گام متغییر برای تعیین سیگنال مرجع استفاده می‌شود.

چکیده - دستیابی به نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم‌های بادی، با کنترل سرعت چرخش روتور توربین بصورت لحظه به لحظه امکانپذیر می‌باشد. بیشتر روش‌های ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) سیستم بادی، بر اساس منحنی حداکثر توان توربین بادی و پروفایل سرعت باد کار می‌کنند. بنابراین استفاده از این روش‌ها بطور عملی با هزینه‌ی بالا و مشکلات فراوان همراه خواهد بود. در این مقاله، استراتژی جدید ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان برای سیستم بادی سرعت متغییر با ماشین سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) ارائه شده است. استراتژی MPPT پیشنهادی بر اساس روش آشوب و مشاهده‌ی اصلاح شده (IP&O) کار می‌کند و مستقل از مشخصات توربین و ژنراتور می‌باشد. جهت کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان پیشنهادی، فاقد هرگونه حسگر مکانیکی می‌باشد. ردیاب MPPT با کنترل مناسب مبدل DC/DC بوسه به ازای سرعت‌های مختلف باد، سیستم را وادار به عملکرد در نقطه‌ی حداکثر توان می‌نماید. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سیستم در محیط MATLAB/SIMULINK، عملکرد مناسب سیستم پیشنهادی را در شرایط متفاوت جوی تصدیق می‌کند.

واژه‌های کلیدی - توربین بادی، ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT)، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)، مبدل بوسه.

### 1- مقدمه

اگرچه سیستم بادی در مقایسه با سیستم خورشیدی هزینه‌ی نصب کمتری دارد، با این حال، با بکارگیری مبدل‌های قدرت مناسب، به نحوی که به ازای تغییرات شرایط جوی، توان کسب شده بهینه باشد، هزینه‌ی سیستم کاهش بیشتری پیدا خواهد کرد [1, 2]. مزیت عمده‌ی توربین‌های بادی سرعت متغییر، دارا

## 2- توربین بادی و مشخصات مکانیکی آن

اگر از اصطکاک روتور صرف نظر کنیم، مشخصات مکانیکی توربین می تواند توسط روابط زیر توصیف شود:

$$T_m - T_{Load} = J \frac{dw}{dt} \quad (1)$$

$$P_m = 0.5 \times C_p \times r \times A \times v_w^3 \quad (2)$$

$T_m(N.m)$  گشتاور مکانیکی توربین،  $T_{Load}(N.m)$  گشتاور بار،  $J$  اینرسی کل سیستم بادی،  $w(rad/s)$  سرعت زاویه ای روتور،  $R(m)$  شعاع روتور،  $A(m^2)$  سطح جاروب پره توربین،  $v_w(m/s)$  سرعت باد،  $C_p$  ضریب توان توربین،  $r(Kg/m^3)$  چگالی هوا،  $P_r$  توان روتور است. نسبت توان مکانیکی کسب شده توربین به توان توده هوا، ضریب توان ( $C_p$ ) نامیده می شود:

$$C_p(I, q) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\Lambda} - c_3 q - c_4 q^X - c_5 \right) \times e^{-c_6 \frac{1}{\Lambda}} \quad (3)$$

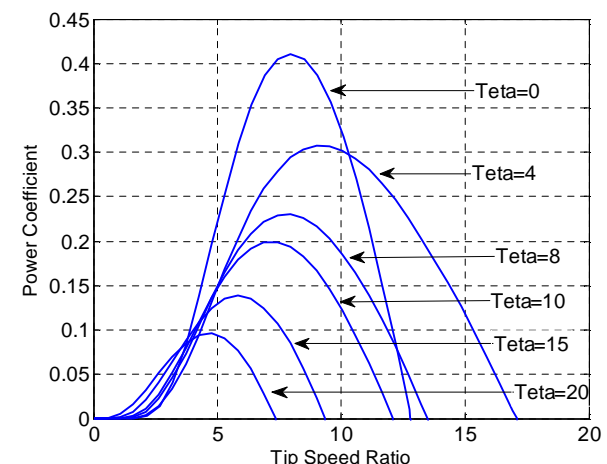
ضرایب  $c_1$  تا  $c_6$  و  $X$  برای توربین های مختلف می تواند متفاوت باشد. پارامتر  $1/\Lambda$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{I + 0.08q} - \frac{0.035}{1 + q^3} \quad (4)$$

حداکثر مقدار  $C_p$  بصورت تئوری، برابر با  $0/593$  ( $C_p = 16/27$ ) می باشد. این مسأله به نام محدودیت Betz معروف می باشد. ضریب توان بصورت تابعی از نسبت سرعت نوک پره ( $\lambda$ ) و زاویه ی پیچ پره ( $\theta$ ) بیان می شود. نسبت سرعت نوک پره توربین بادی ( $I$ ) بصورت زیر تعریف می شود:

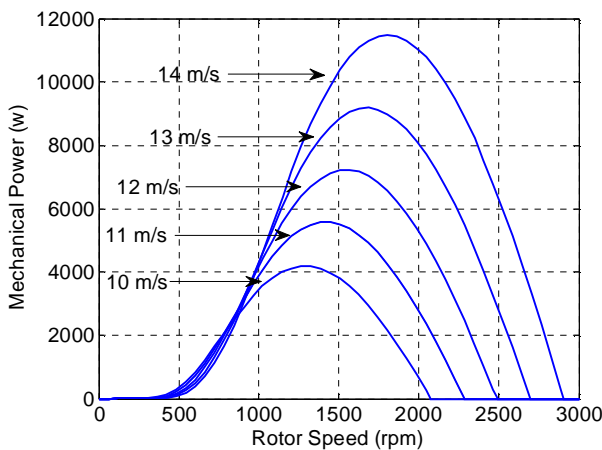
$$I = \frac{Rw}{v_w} \quad (5)$$

منحنی ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره به ازای زوایای پره مختلف برای توربین نوعی، در شکل 1 نشان داده شده است.

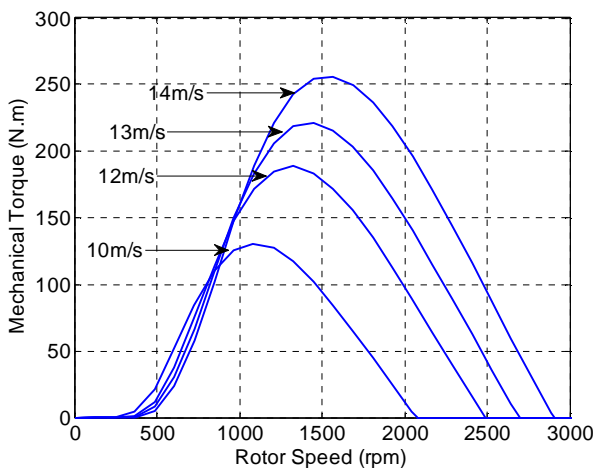


شکل 1- مشخصه ی  $C_p - I$  توربین بادی به ازای مقادیر مختلف زاویه ی پیچ پره

توان خروجی توربین بادی زمانی حداکثر خواهد بود که  $C_p$  حداکثر باشد. این مقدار بهینه ی  $C_p$  در مقادیر متفاوتی از  $I$  اتفاق می افتد. به ازای سرعت باد مشخص، مقدار بهینه ای برای سرعت روتور وجود دارد که توان گرفته شده از باد را حداکثر می کند. بنابراین اگر سرعت باد ثابت در نظر گرفته شود، مقدار  $C_p$  به سرعت روتور توربین بادی بستگی خواهد داشت. از اینرو با کنترل سرعت روتور، توان خروجی توربین کنترل می شود. بعلاوه به ازای سرعت باد مشخص، تنها یک سرعت روتور وجود دارد که منجر به حداکثر توان می شود. همانگونه که در شکل های 2 و 3 نیز مشاهده می شود، نقطه ی حداکثر توان توربین، متفاوت با نقطه ی حداکثر گشتاور می باشد.



شکل 2- مشخصه ی توان-سرعت توربین بادی نوعی به ازای سرعت باد مختلف



شکل 3- مشخصه ی گشتاور-سرعت توربین بادی نوعی به ازای سرعت باد مختلف

## 3- ساختار سیستم بادی

در سیستم تولید بادی، توان موجود در باد با مکعب سرعت باد تغییر می کند، بنابراین جهت حداکثر نمودن توان کسب شده از باد، توربین بادی باید در حالت سرعت متغییر کار کند. برای اجازه ی عملکرد توربین در حالت سرعت متغییر، ما نیاز به جداسازی

3-1 ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان به روش جستجوی

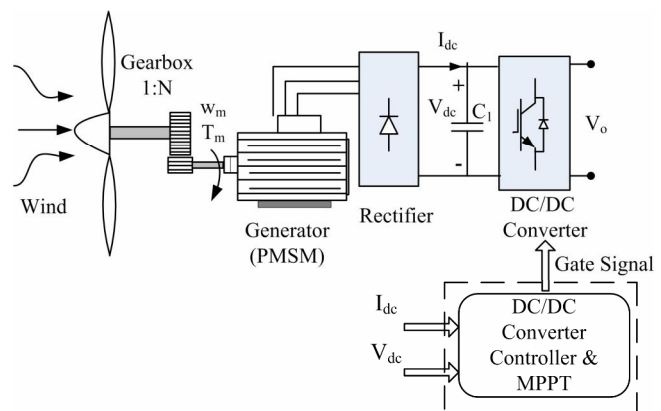
آشوب و مشاهده (P&O)

با استفاده از مشخصه‌ی  $C_p - I$  توربین بادی به ازای سرعت مشخص باد، توان مکانیکی توربین ( $P_m$ ) می‌تواند بصورت تابعی از ولتاژ لینک dc ( $V_{dc}$ )، بیان شود. همچنین  $V_{dc}$  بهینه‌ای وجود دارد که توان خروجی ژنراتور PMSM را حداکثر می‌گرداند [10, 11]. به منظور کسب حداکثر توان از باد، با استفاده از روش P&O مقدار بهینه‌ی ولتاژ  $V_{dc}$  بصورت بلادرنگ جستجو می‌شود. اساس کار الگوریتم P&O به این صورت است که اگر افزایش  $V_{dc}$  در مرحله‌ی قبل منجر به افزایش  $P_m$  گردد، در این حالت جستجو برای پیدا کردن  $V_{dc}$  در همین جهت ادامه پیدا می‌کند و در غیر این صورت، جهت جستجو عکس می‌شود. افزایش توان  $P_m$  با افزایش توان در لینک dc تقریب زده می‌شود. برای کسب حداکثر توان از سیستم بادی باید رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$\frac{dP_m}{dw} = 0 \Rightarrow \frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} = 0 \quad (6)$$

با صرفنظر از تلفات سیستم،  $P_{dc}$  توان الکتریکی تولیدی در خروجی یکسوساز می‌باشد. رابطه‌ی بالا بیان می‌کند که نقطه‌ی حداکثر توان به جای جستجوی شرایط محیطی همچون سرعت و جهت باد، با جستجوی توان در خروجی یکسوساز، می‌تواند ردیابی شود. فلوجارت ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان به روش P&O در شکل 5 نشان داده شده است.

مراحل تولید توان الکتریکی از مصرف الکتریکی داریم. برای انجام این کار ولتاژ سه فاز خروجی ژنراتور مغناطیس دائم (PMSM) بایستی یکسو شده و ولتاژ باس dc تنظیم شود. همچنین بکارگیری اینورتر به عنوان واسط بین تولید و مصرف ضروری است. جهت تأمین تقاضای بار، لازم است تغذیه‌ی توان به نحو مناسبی (در ولتاژ و فرکانس مناسب) صورت پذیرد. این امر به دلیل توانایی مبدل‌های الکترونیک قدرت، جهت عملکرد در ولتاژ و فرکانس مختلف، میسر است. در سیستم تبدیل انرژی بادی، فرکانس ولتاژ خروجی اینورتر، در مقادیر 60 یا 50 هرتز ثابت نگه داشته می‌شود. شکل 4 شماتیک کلی سیستم تولید بادی را نشان می‌دهد. توان بادی توسط مبدل توربین بادی به توان مکانیکی بر روی شفت روتور تبدیل می‌شود. این توان توسط ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. ولتاژ سه فاز تولیدی توسط ژنراتور با بکارگیری یکسوساز کنترل‌ناپذیر دیودی، یکسو می‌گردد. هدف اصلی بکارگیری یکسوساز، جداسازی ولتاژ فرکانس متغییر تولیدی توسط ماشین، از باری که باید در فرکانس ثابت کار کند، می‌باشد. از مبدل DC/DC برای کنترل ولتاژ خروجی یکسوساز ( $V_{dc}$ ) (ولتاژ روی خازن  $C_1$ ) استفاده می‌شود. کنترل‌کننده‌ی ردیاب حداکثر توان، ولتاژ مرجعی را تولید می‌کند که با مقدار واقعی ولتاژ  $V_{dc}$  مقایسه شده و به کنترل‌کننده‌ی PI داده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده‌ی PI با موج مثلثی مقایسه شده و پالس آتش مناسب جهت کنترل کلید مبدل را تولید می‌کند. توربین بادی به ازای سرعت باد مشخص دارای سرعت بهینه‌ای است که در آن، کسب حداکثر توان از باد امکان پذیر می‌گردد. بنابراین با کنترل ولتاژ  $V_{dc}$  امکان کنترل جریان کشیده شده از ژنراتور فراهم می‌شود که با این عمل، امکان کنترل سرعت توربین جهت اخذ حداکثر توان فراهم می‌گردد. در ادامه توضیحات تفصیلی الگوریتم کنترل حداکثر توان با استفاده از مبدل DC/DC ارائه می‌شود.



شکل 4- سیستم توربین بادی به همراه ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT)

### 2-3- ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان با گام متغییر (IP&O)

به منظور بهبود عملکرد الگوریتم نشان داده شده در شکل 5، در روش آشوب و مشاهده‌ی اصلاح شده (IP&O) گام تغییرات  $V_{dc}$  متغییر در نظر گرفته می‌شود. این کار باعث افزایش سرعت همگرایی و دقت سیستم می‌گردد. روش گام متغییر بر اساس روش نیوتن-رافسون عمل می‌کند. در این روش مقدار ریشه تابع از رابطه‌ی زیر محاسبه شود:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{F(X_n)}{F'(X_n)} \quad (9)$$

$X_n$  مقدار موجود  $X$ ،  $F(X_n)$  مقدار تابع در نقطه‌ی  $X_n$ ،  $F'(X_n)$  مشتق تابع در نقطه‌ی  $X_n$  است. تابع  $F(X_n)$  می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$F(X_{n+1}) = F(V_{dc}(n+1)) = \frac{dP}{dV_{dc}} \quad (10)$$

$$= \frac{P(n+1) - P(n)}{V_{dc}(n+1) - V_{dc}(n)} = \text{grad}(n+1)$$

$$F'(X_{n+1}) = F'(V_{dc}(n+1)) = \frac{d^2P}{dV_{dc}^2} \quad (11)$$

$$= \frac{\text{grad}(n+1) - \text{grad}(n)}{V_{dc}(n+1) - V_{dc}(n)}$$

با استفاده از روابط بالا، گام تغییرات ولتاژ  $V_{dc}$  ( $\Delta V_{dc}$ ) بصورت رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\Delta V_{dc} = \frac{F(X_{n+1})}{F'(X_{n+1})} = \frac{P(n+1) - P(n)}{\text{grad}(n+1) - \text{grad}(n)} \quad (12)$$

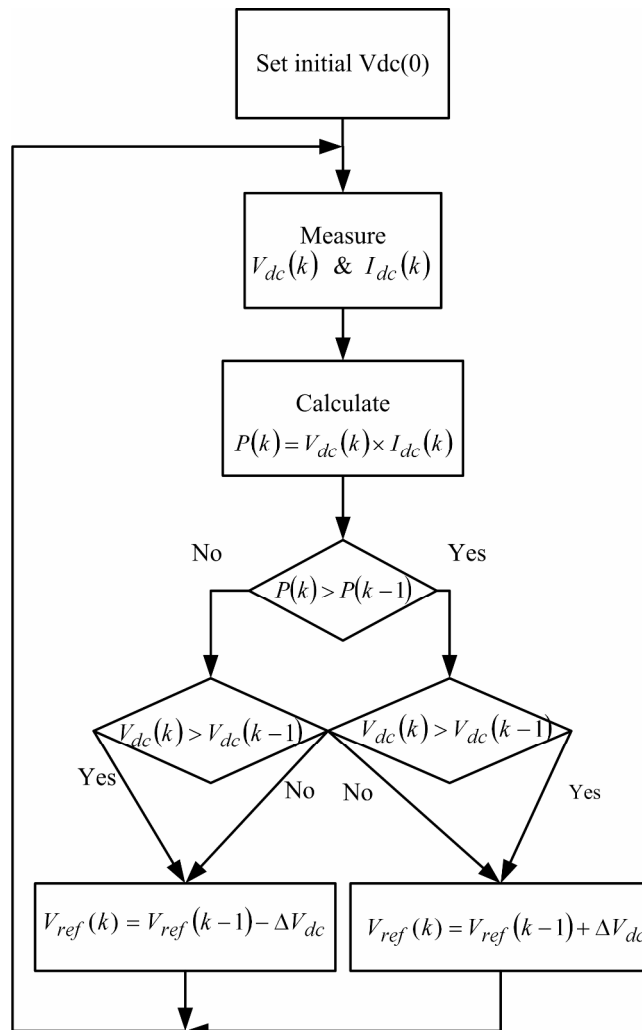
بنابراین ولتاژ مرجع ( $V_{dcref}$ ) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{dcref}(n+1) = V_{dcref}(n) + \Delta V_{dc} \quad (13)$$

با استفاده از گام متغییر، ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان سریعتر به نقطه‌ی حداکثر توان همگرا شده و نواسانات توان کاهش خواهد یافت. مقدار تغییرات گام  $\Delta V_{dc}$  محدود شده است. محدودیت  $\Delta V_{dc}$  بر اساس اندازه‌ی ژنراتور و پارامترهای طراحی سیستم می‌تواند تغییر کند.

### 4- نتایج شبیه‌سازی

جهت بررسی کارکرد استراتژی MPPT پیشنهادی، سیستم بادی با آرایش مشابه شکل 4 در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. جدول 1 ظرفیت توان و پارامترهای توربین بادی را نشان می‌دهد. سیستم الکتریکی شامل: ماشین سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)، یکسوساز، مبدل DC/DC بوست و اینورتر منبع ولتاژ (VSI) می‌باشد. مشخصات ژنراتور PMSM در



شکل 5- فلوجارت ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان به روش P&O

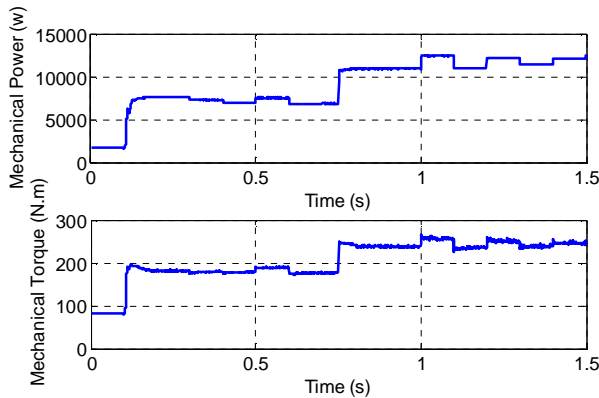
ابتدا فرآیند جستجو با انتخاب مقداری دلخواه برای ولتاژ مرجع  $V_{dc}$  شروع می‌شود ( $V_{ref}$ ). سپس کنترل کننده با استفاده از مقادیر ولتاژ  $V_{dc}$  و جریان  $I_{dc}$  اندازه‌گیری شده‌ی یکسوساز، توان الکتریکی  $P_0$  را محاسبه می‌کند. سپس ولتاژ مرجع به اندازه‌ی  $\Delta V_{dc}$  افزایش پیدا می‌کند. بطوریکه:

$$V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) + \Delta V_{dc} \quad (7)$$

سپس توان  $P(k)$  با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$P(k) = V_{dc}(k) \times I_{dc}(k) \quad (8)$$

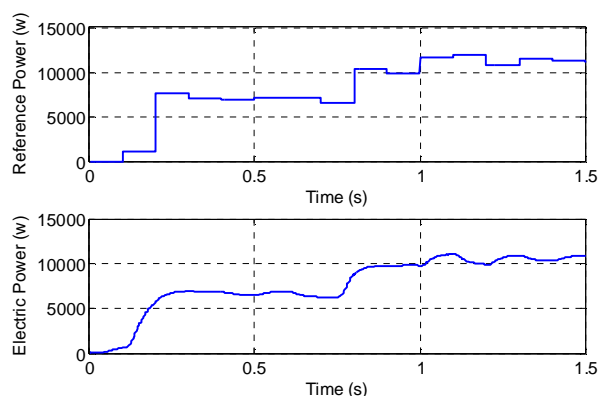
اگر  $P(k) > P_0$  باشد، سیستم به نقطه‌ی حداکثر توان نرسیده است و باید ولتاژ مرجع همچنان به اندازه‌ی  $\Delta V_{dc}$  افزایش یابد و این مقدار توان با توان  $P(k)$  در مرحله‌ی قبل مقایسه شود. این فرآیند تا رسیدن به نقطه‌ی حداکثر توان ادامه پیدا خواهد کرد. اگر  $P(k) < P(k-1)$  در اینصورت ولتاژ مرجع  $V_{dc}$  کاهش داده خواهد شد. لازم به ذکر است که در این حالت تغییرات  $V_{dc}$  با گام ثابت صورت می‌گیرد.



شکل 7- منحنی توان و گشتاور مکانیکی خروجی توربین به ازای تغییرات سرعت باد

در شکل 8 توان مرجعی که توسط کنترل MPPT با تولید ولتاژ مرجع  $dc (V_{ref})$  ایجاد می‌شود، به همراه توان واقعی الکتریکی تولید شده، نشان داده شده است.

همان طوری که قبلاً نیز اشاره شد، مهم‌ترین شاخص جهت بررسی عملکرد سیستم در حالت بهینه و کسب حداکثر توان از باد، مشاهده‌ی ضریب توان توربین ( $C_p$ ) در لحظات مختلف کار سیستم می‌باشد. در شکل 9 مشاهده می‌شود که  $C_p$  در لحظات قبل از تغییر سرعت باد ( $t < 0.75s$ ) بسیار نزدیک به مقدار بهینه-ی ضریب توان توربین یعنی  $0/41$  کار می‌کند. ضمن اینکه در لحظه‌ی تغییر شدید سرعت باد ( $t = 0.75s$ )، سیستم کنترل MPPT در واکنشی مناسب و با پاسخ سریع به این تغییر، ضریب توان توربین را همچنان در مقدار بهینه‌ی آن حفظ می‌کند. حالت گذرای منحنی ضریب توان در لحظه‌ی  $t = 0.75s$  به دلیل تغییر لحظه‌ای نسبتاً بزرگ در میزان سرعت باد می‌باشد که با عملکرد سریع کنترل کننده‌ی MPPT،  $C_p$  به مقدار بهینه بازگردانده می‌شود.



شکل 8- منحنی توان مرجع و توان الکتریکی تولید شده

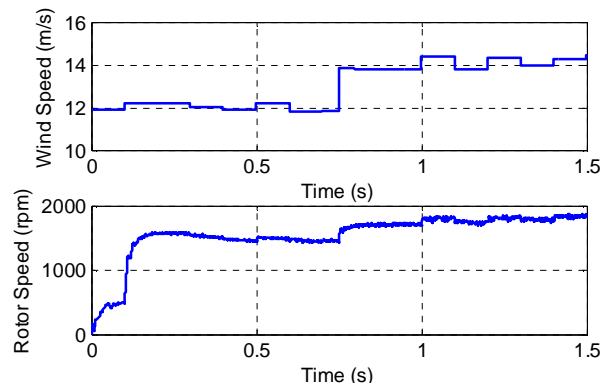
جدول 2 نشان داده شده است. با کد نویسی در محیط MATLAB سیستم ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی الگوریتم ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) برای پروفایل سرعت باد متغییر نشان داده می‌شود. سرعت باد در لحظه‌ی  $t = 0.75s$  تغییر پله‌ای از  $12 m/s$  به  $14 m/s$  دارد. همانگونه که در شکل 6 نشان داده شده است، با عملکرد سیستم کنترل MPPT در واکنش به تغییر سرعت باد، سرعت روتور ژنراتور PMSM در نقطه‌ی کار جدید قرار می‌گیرد. در نتیجه‌ی افزایش سرعت باد و کنترل مناسب سیستم MPPT توان و گشتاور خروجی توربین بادی بصورت منحنی‌هایی که در شکل 7 نشان داده شده است، افزایش می‌یابد.

جدول 1- پارامترهای توربین بادی

| پارامتر                  | مقدار | واحد  |
|--------------------------|-------|-------|
| توان نامی ( $P_{mech}$ ) | 12/3  | $kW$  |
| سرعت باد نامی            | 12    | $m/s$ |
| قطر روتور                | 4/6   | $m$   |
| زاویه‌ی پیچ پره          | 0     | $deg$ |
| حداکثر ضریب توان         | 0/41  | -     |

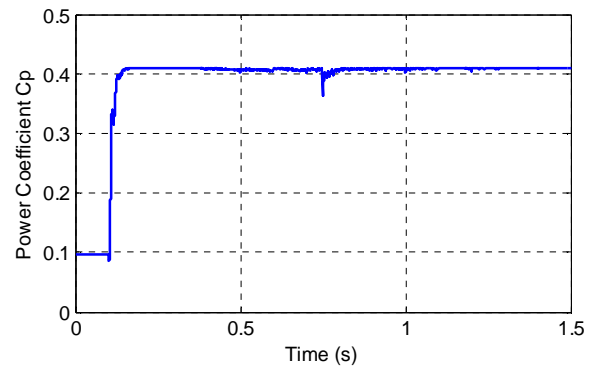
جدول 2: پارامترهای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)

| پارامتر                      | مقدار  | واحد     |
|------------------------------|--------|----------|
| توان نامی ( $P_e$ )          | 14     | $kW$     |
| مقاومت استاتور $r$           | 0/0485 | $\Omega$ |
| اندوکتانس استاتور $L_q, L_d$ | 0/395  | $mH$     |
| شار القایی توسط مغناطیس دائم | 0/1194 | $Wb$     |
| ممان اینرسی $J$              | 0/0027 | $Kg.m^2$ |
| تعداد قطب $P$                | 4      | -        |



شکل 6- پروفایل سرعت باد و سرعت روتور ژنراتور

- [10] T. Tanaka, T. Toumiya, T. Suzuki, "Output control by hillclimbing method for a small scale wind turbine generating system," *Renewable Energy*, Vol. 12, No. 4, 1997, pp. 387-400.
- [11] Q. Zeng, L. Chang and R. Shao, "Fuzzy-Logic Based Maximum Power Point Tracking Strategy for PMSG Variable-Speed Turbine Generation Systems," in *Proc. CCECE 2008, Canadian Conf. on Electrical and Computer*, pp. 405-410, May 2008.



شکل 9- ضریب توان توربین بادی با ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT)

## 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، استراتژی جدید ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان (MPPT) به روش جستجوی آشوب و مشاهده‌ی اصلاح شده (IP&O) با گام متغییر برای سیستم تولید بادی سرعت متغییر ارائه شد. این استراتژی مستقل از مشخصات توربین و ژنراتور است. جهت کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، ردیاب نقطه‌ی حداکثر توان پیشنهادی، فاقد هرگونه حسگر مکانیکی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استراتژی MPPT می‌تواند بطور خودکار به جستجوی نقاط کار بهینه پرداخته و حداکثر توان خروجی کسب شده به ازای تغییرات شرایط جوی از جمله سرعت باد را در پی داشته باشد.

## 6- مراجع

- [1] R.D. Prasad, R.C. Bansal, M. Sauturaga, "Some of the design and methodology considerations in wind resource assessment," *IET Renew. Power Gener.*, Vol. 3, No. 1, pp. 53-64., 2009.
- [2] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 2, APRIL 2006.
- [3] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2002.
- [4] A. M. Knight and G. E. Peters, "Simple wind energy controller for an expanded operation range," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, pp. 459-466, Jun. 2005.
- [5] S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 60-67, Jan./Feb. 2005.
- [6] K. Tan and S. Islam, "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 2, pp. 392-399, Jun. 2004.
- [7] F. Valenciaga and P. F. Puleston, "Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 20, no. 2, pp. 398-405, Jun. 2005.
- [8] R. Datta and V. T Ranganathan, "A method of tracking the peak powerpoints for a variable speed wind energy conversion system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 1, pp. 163-168, Mar. 2003.
- [9] C. Pan and Y. Juan, "Novel Sensorless MPPT Controller for a High-Efficiency Microscale Wind Power Generation System," *IEEE Trans. Energy Conversion*. Vol 24, pp. 1-10, Jun. 2009.