



کنترل دینامیک توربین بادی سرعت متغیر توسط جذب توان از شبکه قدرت

بهزاد صداقت ، غلامحسین ریاحی

با افزایش پله ای سرعت باد، زاویه حمله به طور ناگهانی دچار افزایش می‌شود، در این شرایط اگر توربین در نقطه کار بهینه خود قرار داشته باشد، این افزایش زاویه حمله باعث کاهش نیروی کشنده می‌شود (شکل 1). کاهش نیروی کشنده باعث کاهش گشتاور و در نتیجه انرژی استحصال شده از توربین بادی می‌شود. سپس توربین سرعت گرفته تا با کم کردن زاویه حمله دوباره به نقطه کار بهینه خود باز گردد.

کم کردن یا برداشتن بار از روی محور توربین بادی باعث می‌شود رسیدن به نقطه کار جدید در زمان کمتری صورت گیرد و این موضوع باعث می‌گردد، انرژی استحصال شده از توربین در نهایت افزایش یابد [1].

در این شرایط انتظار می‌رود تزریق توان عمده به توربین باعث شود تا توربین در زمان کوتاه‌تری نسبت به حالت قبل سرعت گرفته، زاویه حمله سریعتر کاهش یابد و توربین سریعتر به نقطه کار بهینه خود باز گردد. به عبارتی دیگر تزریق توان به توربین در یک زمان کوتاه باعث می‌شود تا بارگیری کامل از توربین زودتر آغاز شود.

در این مقاله نشان داده می‌شود که نه تنها صفر کردن بار هنگام افزایش پله ای سرعت باد، بلکه تزریق توان به توربین در این لحظه، باعث افزایش انرژی استحصال شده از توربین می‌شود. ضمناً نشان داده می‌شود، بهترین نقطه برای تزریق توان به توربین لحظه افزایش پله ای سرعت باد می‌باشد.

2- توان موجود در باد، توان استحصال شده و C_p منحني

توان موجود در باد تحت تاثیر مستقیم دو شاخص اصلی

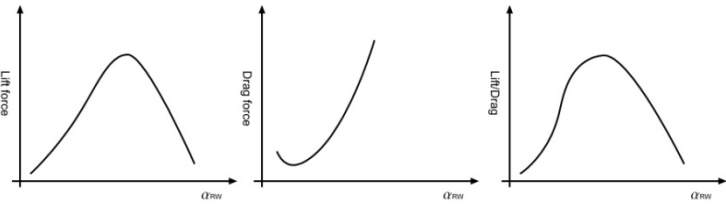
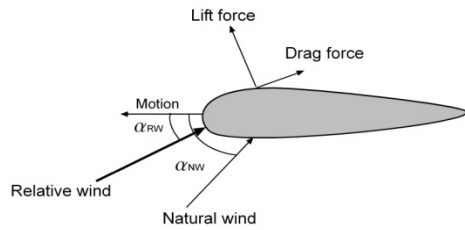
چکیده - افزایش ناگهانی سرعت باد عبوری از توربین های بادی باعث کاهش انرژی دریافتی از آنها می‌شود. در این شرایط امکان ایستادن توربین های بادی نیز وجود دارد. در این مقاله روشی ارائه می‌شود که ضمن افزایش انرژی استحصال شده از توربین های بادی، از ایستادن توربین در حضور افزایش پله‌ای سرعت باد جلوگیری می‌کند. با استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم افزار PSCAD/EMTDC اثبات می‌شود، تزریق توان از شبکه قدرت به توربین بادی در مدت زمانی کوتاه همزمان با آغاز افزایش سرعت باد، باعث می‌شود تا علاوه بر باز پس دهی انرژی قرضی از شبکه، انرژی خالص دریافتی از توربین بادی افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی - توربین بادی، دینامیک، سیستم قدرت، کنترل بهینه

1- مقدمه

هنگامیکه سرعت باد عبوری از توربین های بادی تغییر می‌کند، به دنبال آن زاویه حمله پره ها تغییر می‌کند. با تغییر در زاویه حمله، مقدار نیروی های کشنده و فشاردهنده ایجاد شده بروی پره‌ها دچار تغییر می‌شود [3]. زاویه میان راستای بردار سرعت باد نسبی و راستای حرکت پره های توربین را زاویه حمله α می‌نامند. راستای سرعت نسبی باد، برآیندی از سرعت باد واقعی و بردار سرعت باد ناشی از حرکت توربین بادی است.

در شکل 1 دیده می‌شود که نیروی کشنده در اثر افزایش کاهش بیش از اندازه زاویه حمله، کاهش می‌یابد در حالیکه نیرو فشار دهنده در اثر افزایش زاویه حمله، سیری صعودی دارد. در توربین های نوع «کشنده» (مدل مورد بحث در این مقاله) نیروی برآیند بیشتر تحت تاثیر نیروی کشنده می‌باشند [1].



Drag force - نیروی فشار دهنده

Lift force - نیروی کشنده

Relative wind - راستای وزش نسبی باد

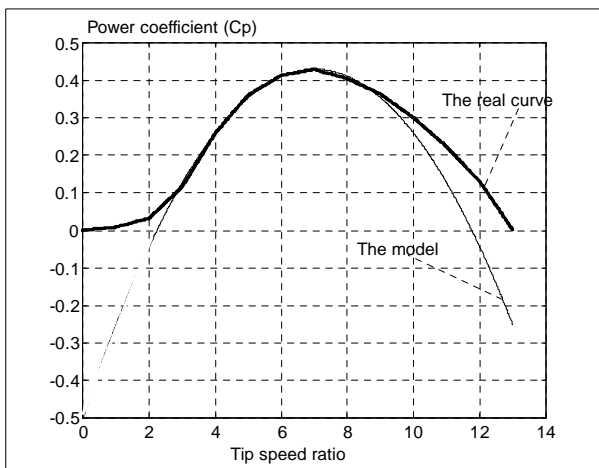
Natural wind - راستای وزش طبیعی باد

α_{RW} - زاویه حمله واقعی

α_{NW} - زاویه حمله ایستا

شکل 1- چپ، ایجاد نیروی کشنده بروی پره های توربین، راست، تغییرات نیروها بر اساس تغییرات زاویه حمله

پرخش روتور (ω) دارد.



شکل 2- نمونه ای از منحنی واقعی و تقریب زده شده Cp

می باشد (رابطه 1)، سرعت باد و مساحت جاروب شونده توسط تیغه های توربین [1]. توربین های بادی قادر نیستند کل توان موجود در باد را تبدیل کنند. شاخصه «ضریب توان» مشخص می کند که یک توربین بادی قادر است تا چه مقدار از کل توان موجود در باد را تبدیل به توان مکانیکی کند (رابطه 2).

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_W^3 \quad (1)$$

$$P_{Extracted} = P_{Wind} \cdot C_p \quad (2)$$

استحصال توان $P_{Extracted}$

شده، P_{Wind} ، توان موجود در باد با سطح مقطع A ، $C_p(\lambda)$ ، ضریب توان توربین، V_W ، سرعت باد، ρ ، چگالی هوا، A ، سطح جاروب شونده.

منحنی C_p بیانگر رفتار مکانیکی توربین بادی در شرایط متنوعی می باشد. این منحنی ارتباط بین سرعت نوک پره و بازده توربین را برقرار می کند. به طوریکه این نسبت سرعت نوک پره رابطه مستقیم با شعاع مساحت جاروب شونده (R)، سرعت چرخش روتور (ω) و رابطه معکوس با سرعت باد (V_W) دارد.

منحنی C_p توربین مورد استفاده قرار گرفته در این مقاله با مشخصات، توان نامی برابر 17 kW، شعاع روتور برابر 5.4 m و ثابت اینرسی برابر 2500 kgm^2 در شکل 2 ارائه شده است [1].

$$\text{Stored Energy} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (4)$$

(2) انرژی که صرف بار شده و یا در سیستم های مکانیکی و الکتریکی توربین تلف می شود.
شکل 3 سیر انرژی را در سیستم تبدیل انرژی توربین نمایش می دهد.

4- کنترل بهینه

در یک کنترل بهینه، کنترل کننده باید قادر باشد در همه حال توربین را در نقطه کار بهینه حفظ کند. این بدان معناست که توربین در سرعت های متنوعی از باد در نقطه کار بهینه باقی بماند تا بیشترین بازده را داشته باشد. ضمناً کنترل کننده باید قادر باشد از ایستادن توربین جلوگیری کند. باقی ماندن در نقطه کار بهینه باعث می شود توربین در سرعت های متغیری کار کند [7].

یک روش ارائه شده برای کنترل توربین بادی، استفاده از کنترل کننده های تغییر زاویه پره می باشد. این کنترل کننده ها با تغییر زاویه پره، زاویه ایرفویل پره ها را تغییر داده و در نتیجه باعث تغییر

3- انرژی استحصال شده

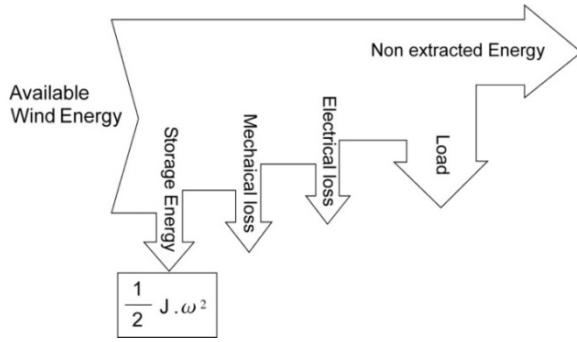
برای محاسبه انرژی استحصال شده از توربین بادی از رابطه 3 استفاده می شود.

$$\text{Extracted Energy} = \int_0^t P_{Extracted}(t) \cdot dt \quad (3)$$

$P_{Extracted}$ ، توان استحصال شده در لحظه τ

این انرژی دریافت شده از باد توسط توربین بادی به دو بخش تقسیم می شود.

(1) انرژی ذخیره شده در روتور در حال چرخش (رابطه 4)، این مقدار انرژی بستگی به ثابت اینرسی روتور (J) و سرعت زاویه ای



شکل 3- دیاگرام جریان انرژی در یک توربین بادی

شده از توربین در زمان شتابگیری نیز کاهش می یابد.

برای اینکه مزایای تزریق توان به توربین در هنگام شتابگیری دیده شود، دو انرژی با یکدیگر مقایسه می شوند. یکی از این دو، انرژی استحصال شده از توربین در حالتی که شتابگیری در حضور مقادیر متنوعی از بار صورت می گیرد و انرژی دیگر که ثابت نگاه داشته می شود، مقدار انرژی دریافتی در حالت بیشترین تزریق توان می باشد.

تزریق توان به توربین همان تغییر جهت دادن سیر توان توربین است. این تغییر را می توان با تغییر علامت بار نشان داد. به طوریکه هنگام بارگیری آنرا مثبت و هنگام تزریق آنرا با علامت منفی نمایش می دهیم.

طول زمان شبیه سازی برای تمامی حالات یکسان در نظر گرفته می شود. این زمان طولانی ترین زمانی است که روتور قادر است پس از تغییر پله ای سرعت باد و در حضور مقادیر متنوعی از بار، سرعت گرفته تا به نقطه کار بهینه خود در شرایط پایدار برسد.

پس با تغییر در بار توربین می توان سرعت چرخش توربین را افزایش یا کاهش داد. همانطور که در شکل 3 دیده می شود، تغییر در بار باعث تغییر در سرعت چرخش روتور می شود. برای بدست آوردن بهینه ترین سرعت چرخش توربین می توان با داشتن سرعت باد (V_w)، شعاع روتور توربین (R)، و مقدار بهینه TSR، از رابطه 6 استفاده کرد.

$$w_m = \frac{I_m \cdot V_w}{R} \quad (6)$$

زاویه حمله توربین می شوند و سپس می توانند باعث شوند که سرعت چرخش توربین تغییر کند.

به دلیل اینکه این روش باعث ایجاد پیچیدگی هایی در سیستم مکانیکی می شود و کاهش استقامت توربین را به دنبال دارد. در بیشتر توربین ها از زاویه پره ثابت استفاده می شود.

روش دیگری که تا کنون ارائه شده است، صفر کردن بار در هنگام افزایش پله ای سرعت باد می باشد. در این روش کنترل کننده در هنگام افزایش پله ای سرعت باد، بار را از توربین برداشته تا توربین آزادانه سرعت بگیرد و به نقطه کار بهینه جدید بازگردد [1]. در این حالت انرژی دریافت شده از توربین افزایش می یابد. ضمناً از ایستادن توربین نیز جلوگیری می شود. در حضور کلیه مزیت های این روش کنترل، عدم بارگیری از توربین در مدتی که توربین قرار است سرعت بگیرد و به نقطه بهینه بازگردد، از مسائلی است که در مورد این کنترل کننده مطرح است.

5- روش ارائه شده در این مطالعه

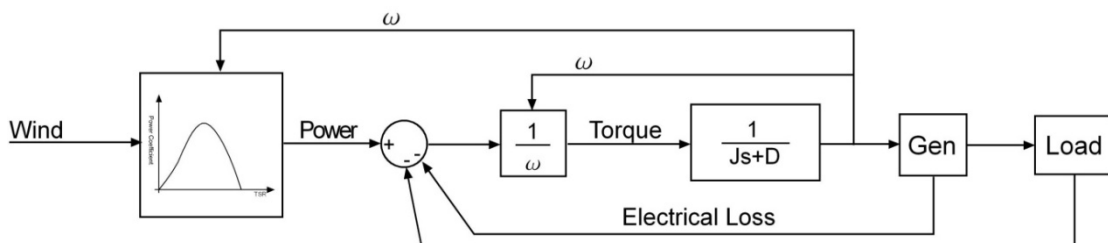
اگر توربین بادی در نقطه کار بهینه خود (ماکزیمم بازده) در حال کار باشد، یک تغییر پله ای مثبت در سرعت باد باعث کاهش نسبت سرعت نوک پره می شود. هنگامیکه تغییر پله ای در سرعت باد اتفاق می افتد، سرعت چرخش توربین به دلیل بالا بودن ثابت زمانی توربین نسبت به تغییر ناگهانی در سرعت باد، تقریباً تغییر نمی کند. این اتفاق باعث کاهش ناگهانی مقدار TSR می شود (رابطه 5).

$$TSR \text{ (Tip Speed Ratio)} = I = \frac{V_{BladeTip}}{V_{Wind}} = \frac{R \cdot \omega}{V_{Wind}} \quad (5)$$

R ، شعاع روتور، ω ، سرعت چرخش توربین

این کاهش در مقدار TSR با توجه به شکل 2 باعث کاهش بازده و در نتیجه کاهش توان تبدیل شده در خروجی می گردد. در این شرایط باید بار توربین کاهش داده شود تا از ایستادن آن جلوگیری شود و توربین قادر باشد دوباره سرعت بگیرد و به نقطه کار بهینه باز گردد.

هرچه این کاهش بار در هنگام سرعت گرفتن توربین بیشتر باشد، زمان شتابگیری کاهش یافته و همینطور انرژی استحصال



شکل 4- مدل بدست آمده برای توربین بادی بر اساس معادله دیفرانسیل

6- مدل دینامیکی توربین بادی

معادله دیفرانسیل بیانگر رفتار مکانیکی یک سیستم تبدیل انرژی باد مطابق روابط 7 می باشد [4].

$$P_{Extracted} - P_{Load} = P_{Storage} + P_{MechanicalLoss} \Rightarrow$$

$$P_{Storage} = J \cdot \frac{dw(t)}{dt} \cdot w(t),$$

$$P_{MechanicalLoss} = D \cdot w(t)^2,$$

$$P_{Extracted} = P_{Wind} \cdot C_p(I)$$

$$P_{Wind} \cdot C_p(I) - P_{Load} = J \cdot \frac{dw(t)}{dt} \cdot w(t) + D \cdot w(t)^2$$

$$T = J \cdot \frac{dw(t)}{dt} + D \cdot w(t)$$

(7)

$P_{Extracted}$ ، توان استحصال شده، P_{Load} ، توان بار، $P_{Storage}$ ، توان ذخیره شده در سیستم، $P_{MechanicalLoss}$ ، توان مکانیکی تلف شده، $C_p(I)$ ، ضریب توان توربین، $w(t)$ ، سرعت روتور، D ، ثابت اصطکاک، J ، ثابت اینرسی، T ، گشتاور توربین

توربین انتخاب شده برای مطالعه دارای اصطکاک بسیار کوچکی می باشد که قابل صرفه نظر کردن است. به عبارت دیگر ثابت اصطکاک D ، برابر با صفر قرار داده می شود.

منحنی واقعی C_p مربوط به این توربین با یک منحنی درجه دو تقریب زده می شود. که این تقریب در فاصله TSR برابر 3 تا 9 بسیار شبیه به منحنی اصلی می باشد. (شکل 2 و رابطه 8).

$$C_p(I) = C_m - a(I - I_m)^2 \quad (8)$$

ضمناً اشاره می شود که در حضور تابع پله باد ارائه شده، نقطه کار توربین در این محدوده می باشد که در این محدوده، منحنی

تقریب زده شده کاملاً بروی منحنی اصلی قرار می گیرد.

در صورتیکه رابطه 8 در رابطه 7 جایگزین شود، مدلی برای توربین بادی بدست می آید (شکل 4). برای پیاده سازی این مدل در نرم افزار شبیه ساز (PSCAD/EMTDC) بلوک هایی طراحی شده است.

پس از جایگزینی مشاهده می شود که هیچ نوع راه حل تحلیلی برای بدست آوردن $w(t)$ وجود ندارد.

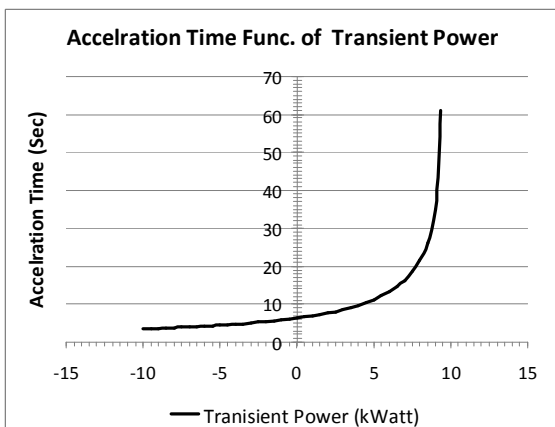
7- مقایسه میان انرژی ها

برای مقایسه انرژی های استحصال شده، مقادیر مختلف توان گذرا، این انرژی برای یک محدوده وسیعی از توان گذرا محاسبه و در نمودارها مقایسه می شود. توان گذرا باری است که در هنگام شتابگیری و درست در لحظه افزایش پله ای سرعت باد به توربین متصل شده و پس از اتمام شتابگیری به بار کامل تبدیل می شود. در کلیه حالت ها به توربین اجازه داده می شود تا سرعت گرفته و دوباره به نقطه کار بهینه بازگردد. سپس در این نقطه بار کامل به توربین متصل می شود.

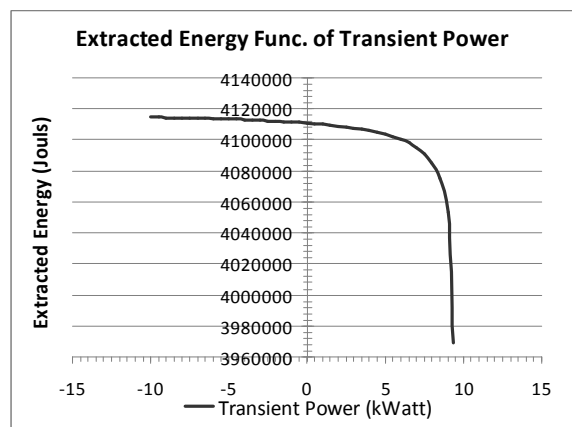
منحنی شکل 5 نشان دهنده انرژی استحصال شده از توربین در مقادیر مختلف توان گذرا P_t می باشد. منحنی شکل 6 نشان دهنده زمان شتابگیری توربین در مقادیر متفاوت توان گذرا P_t می باشد. این زمان از لحظه آغاز سرعت گیری روتور یعنی لحظه تغییر پله ای سرعت باد تا لحظه بازگشت دوباره توربین به نقطه بهینه می باشد.

همانطور که مشاهده می شود، انرژی استحصال شده از توربین، با کاهش بار گذرا به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می کند.

این موضوع نشان می دهد که با تزریق توان به توربین در زمانی خاص، علاوه بر بازپس دهی انرژی قرضی، انرژی استحصال شده از



شکل 6- تغییرات زمان شتابگیری توربین بادی بر اساس تغییرات توان گذرا، نشان دهنده کاهش زمان شتابگیری توربین بادی



شکل 5- تغییرات انرژی استخراج شده بر اساس تغییرات توان گذرا نشان دهنده افزایش انرژی دریافت شده از توربین بادی

توربین افزایش می‌یابد. ضمناً مشاهده می‌شود که با تزریق توان به توربین، زمان سرعت گیری توربین نیز به شدت کاهش می‌یابد.

8- نتیجه گیری

در شرایطی که توربین در نقطه کار بهینه خود در حال کار است، یک افزایش پله ای در سرعت باد باعث کاهش توان دریافتی از توربین می‌شود. برای جلوگیری از ایستادن توربین و کمک به شتاب گیری می‌بایست توان بار کاهش داده شود. در این مقاله نشان داده شد که نه تنها صفر کردن بار هنگام افزایش پله ای سرعت باد، بلکه تزریق توان به توربین در این لحظه، باعث افزایش انرژی استحصال شده از توربین می‌شود. تزریق توان به توربین درست در لحظه افزایش پله ای سرعت باد و در یک زمان بسیار کوچک انجام می‌شود. توربین پس از این، سرعت گرفته تا دوباره در نقطه کار بهینه جدید قرار گیرد. افزایش انرژی استحصال شده، کاهش زمان سرعت گیری، امکان بارگیری سریعتر از توربین بادی و همچنین جلوگیری از ایستادن توربین از مهمترین نتایج روش ارائه شده می‌باشد.

9- مراجع

- [1] G. H. Riahy, "Dynamic Wind Turbine Energy Extraction, Showing the Benefits of Short Term Wind Prediction", 1996.
- [2] Gerlof Slootweg, Ph.d Thesis, Wind Power, Modeling and Impact on Power System Dynamics.
- [3] J. Park, The Wind Power Book, Cheshire Books, 1981.
- [4] G. H. Riahy, "Modeling and Simulation of Wind turbine System for Controller Study Purposes", 1999.
- [5] Mukund R. Patel, Wind & Solar Power Systems, CRC Press, 1999.
- [6] Tomas Petru, Ph.d Thesis, "Modeling of Wind Turbines for Power System Studies", Chalmers University of Technology, 2003.
- [7] R Leithead W.E., "Variable Speed Operation - Does it Have Any Advantages?", Wind Engineering, v13 n6 p302, 1989.