

مدل دینامیکی توربین‌های بادی بر مبنای استفاده از ژنراتورهای القایی با تغذیه ی دوبل

هادی طاریمردادی

دانشگاه مازندران

ایران

h_moradi2@yahoo.com

کلمات کلیدی: توربین بادی، مدل دینامیکی، ژنراتورهای القایی با تغذیه ی دوبل، دریافت ماکزیمم انرژی،

چکیده:

در این مقاله یک مدل دینامیکی برای توربین‌های بادی ارائه شده و از یک ماشین القایی با تغذیه ی دوبل (روتور سیم پیچی شده) به عنوان ژنراتور استفاده شده است. روتور از طریق کانورتر منبع ولتاژ تغذیه شده و استاتور نیز مستقیماً به شبکه وصل می‌شود. با استفاده از جهت یابی میدان استاتور توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی به صورت مستقل از همدیگر کنترل شده اند. سرعت مرجع برای کنترلر تابعی از سرعت باد است و برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد انتخاب می‌شود. مقدار مرجع توان راکتیو را نیز می‌توان برای مینیمم کردن تلفات مسی، تنظیم ضریب توان یا حداقل کردن تلفات توان در کانورترها انتخاب کرد. کنترلرهای سرعت و توان راکتیو از نوع PID می باشند که نتایج شبیه سازی کارایی چنین کنترلرهایی را در دریافت ماکزیمم توان از باد و توان راکتیو مطلوب نشان می‌دهند.

مقدمه:

برای دریافت انرژی از باد روشهای مختلفی وجود دارد مانند استفاده از ماشین‌های سنکرون یا آسنکرون، کنترل محل استقرار^۱ یا کنترل زاویه ی پره^۲. اما در همه ی این روش‌ها یک نتیجه ی یکسان وجود دارد و آن اینست که تغییر سرعت باد، در قدرت منتقل شده به شبکه تاثیر خواهد داشت. نشان داده شده است که برای توربین‌های بادی متصل به شبکه، بازده سیستمهای سرعت متغیر از سیستمهای با سرعت ثابت بیشتر است.^[۱]

مزایای سیستمهای سرعت متغیر به شرح زیر است:^[۲]

- کاهش اساسی در نوسان (ریپل) گشتاور توربین بادی و بنابراین کیفیت بهتر توان خروجی

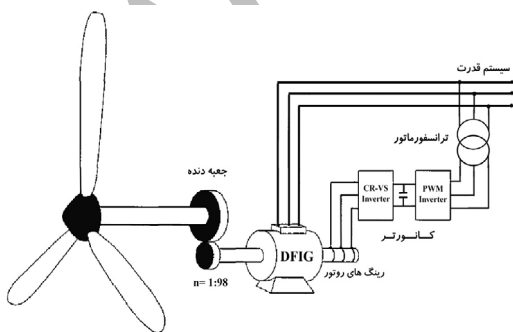
1. Stall control
2. Pitch control

سرعت را دنبال کرد و با کنترل توان راکتیو بر ضریب توان شبکه تاثیر گذاشت.

با توجه به مشخصه‌ی توربین، یک مدل دینامیکی برای توربین بادی ایجاد شده است تا گشتاور مکانیکی آن را در سرعت‌های مختلف باد و ژنراتور، مدل کند. البته در تعیین مقدار مرجع توان راکتیو فاکتورهای زیادی دخیل هستند، مثلاً می‌توان توان راکتیو را طوری تنظیم کرد که تلفات مسی حداقل شود [۳]، یا تلفات و قدرت کانورترهای طرف روتور به کمترین مقدار برسد [۴] و....

نمای کلی سیستم تولید

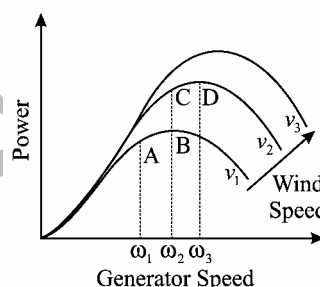
طرح کلی تولید انرژی الکتریکی از باد بر مبنای استفاده از ژنراتورهای القایی با تغذیه‌ی دوبل در شکل (۲) نشان داده شده است همانطوریکه ملاحظه می‌شود، استاتور مستقیماً و روتور نیز از طریق دو کانورتر پشت به پشت ۴ به شبکه متصل می‌شود. کانورتر طرف روتور یک اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان ۵ است و کانورتر طرف استاتور نیز یک اینورتر PWM می‌باشد. که با کنترل اینورتر طرف روتور می‌توان گشتاور و توان راکتیو را با استفاده از مؤلفه‌های مولد آنها از جریان روتور، به صورت مستقل از همدیگر کنترل کرد.



شکل (۲): نمای کلی تولید انرژی از باد با استفاده از ژنراتور القایی

- کاهش فشارهای مکانیکی و رزونانس‌های مد پیچشی
- کاهش انتشار نویز مخصوصاً در سرعت‌های پایین
- دریافت ماکزیمم انرژی از باد با توجه به مشخصه‌های توربین

در شکل (۱) مشخصه‌ی کلی توان توربین‌های بادی بر حسب سرعت ژنراتور و به ازای مقادیر مختلف سرعت باد نشان داده شده است.



شکل (۱): توان ژنراتور بر حسب سرعت ژنراتور و باد

اگر سرعت باد v_1 باشد و ژنراتور با سرعت ω_1 در حال چرخش باشد، نقطه‌ی A نقطه‌ی کار است، با افزایش سرعت ژنراتور به ω_2 و رسیدن به نقطه‌ی B قدرت الکتریکی خروجی ژنراتور هم بیشتر خواهد شد و اگر سرعت باد به v_2 برسد، نقطه‌ی C کار خواهد شد که باز با افزایش ω و رسیدن به ω_3 توان خروجی بیشتری را دریافت خواهیم کرد. سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم قدرت از باد، باید این تغییرات سرعت را دنبال کند. این تابع کنترل معمولاً به وسیله‌ی یک کنترلر PID عملی می‌شود. [۱]

در این مقاله از یک ژنراتور القایی با تغذیه‌ی دوبل^۳ (DFIG) برای تنظیم سرعت توربین استفاده شده است. با استفاده از اصول کنترل مستقل در کنترل برداری، توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی به صورت مستقل از همدیگر قابل کنترل هستند، که با کنترل گشتاور الکترومغناطیسی می‌توان تغییرات

4. Back to Back

5. Current Regulate –Voltage Source (CR-VS) Inverter

3. Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

معادلات و مدل توربین بادی

میزان توانی که توربین‌های بادی می‌توانند از باد استخراج کنند به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$P_m = C_p P_w \quad (1)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_w^3$$

که در اینجا P_m توان مکانیکی است که توسط توربین بادی از باد گرفته شده است، P_w توان موجود در باد است، ρ چگالی هواست بر حسب $[kg/m^3]$ شعاع پره‌های توربین است $[m]$ ، v_w سرعت باد است بر حسب $[m/s]$ و C_p نیز ضریب کارایی^۶ است.

ضریب کارایی (C_p) مشخص کننده‌ی درصد یا قسمتی از انرژی موجود در باد است که به وسیله‌ی توربین قابل استخراج است. بیشترین مقدار توربین C_p در سال ۱۹۲۶ به وسیله‌ی بتز^۷ محاسبه شده که مقدار آن $C_{p\text{ Betz}} = 16/27 = 0.593$ است و به ثابت بتز^۸ معروف است. یعنی در واقع بیشترین درصدی از انرژی باد که به وسیله‌ی توربین بادی قابل استخراج است 59.3% است. [۵].

C_p علاوه بر شکل آیرودینامیکی پره، طبق روابط داده شده به عوامل دیگری نیز بستگی دارد.

$$C_p = f(\lambda, \theta) \quad (2)$$

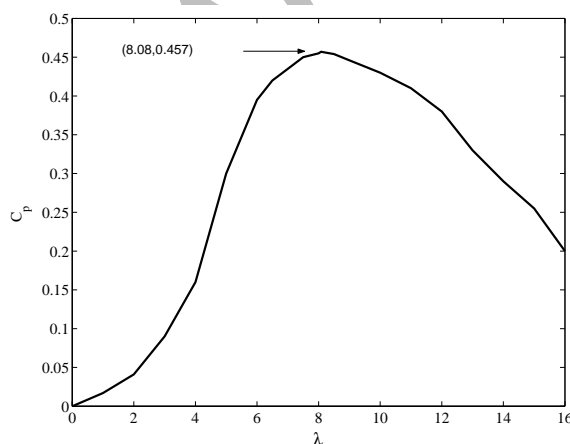
$$\lambda = \frac{v_t}{v_w} = \frac{R\omega_t}{v_w}$$

که λ نسبت سرعت نوع پره توربین به سرعت باد^۹ است، θ زاویه پره^{۱۰} است، v_t سرعت نوک پره توربین است بر حسب $[m/s]$ و ω_t سرعت چرخشی پره‌های توربین است بر حسب $[rad/sec]$.

در توربین‌های بادی کنترلر سرعت روتور همراه با کنترلر زاویه‌ی پره، سرعت روتور را کنترل می‌کنند. اما کنترلر زاویه‌ی پره فقط در سرعت‌های بالای باد فعال می‌شود. در چنین وضعیتی (در سرعت‌های بالای باد) سرعت روتور به وسیله‌ی افزایش گشتاور الکترومکانیکی نمی‌تواند کنترل شود زیرا این عمل باعث *Overload* شدن ژنراتور و کانورترهای طرف روتور خواهد شد. برای جلوگیری از افزایش خیلی زیاد سرعت روتور که می‌تواند باعث صدمات مکانیکی شود زاویه‌ی پره‌ها تغییر خواهد کرد تا C_p کاهش یابد و در واقع انرژی کمتری از باد دریافت شود [۲].

در توربین‌های بادی C_p به وسیله‌ی یک منحنی غیر خطی بر حسب λ به ازای θ های مختلف مشخص می‌شود. منحنی که در این مدل استفاده شده است (شکل (۳))، تقریبی از منحنی C_p بر حسب λ به ازای $\theta = 0$ در یک توربین بادی 1.65 MW است. [۱] ماکزیمم مقدار C_p مطابق منحنی موجود 0.457 می‌باشد و بر طبق آن مقدار λ برای دریافت ماکزیمم توان از باد $\lambda = 8.08$ است.

با استفاده از سرعت باد 8 m/s به عنوان سرعت متوسط در یک سایت و شعاع پره‌ی 33 m سرعت چرخشی پره‌های توربین برای دریافت ماکزیمم توان به صورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل (۳): ضریب کارایی یک توربین 1.65 MW

6. Coefficient of Performance

7. Betz

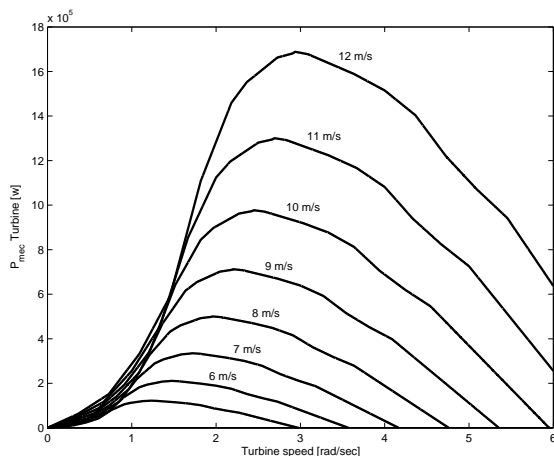
8. Betz Coefficient

9. Tip speed ratio

10. Pitch angle

مکانیکی توان الکتریکی تحویلی توسط ژنراتور بدست می‌آید.

منحنی غیر خطی C_p بر حسب λ را می‌توان با استفاده از روابط ۱ و ۲، به منحنی توان مکانیکی بر حسب سرعت توربین و به ازای مقادیر مختلف سرعت باد تبدیل کرد. در شکل (۴) این منحنی‌ها برای توربین مورد مطالعه رسم شده‌اند.



شکل (۴): توان مکانیکی توربین به ازای سرعت‌های مختلف باد

در شبیه‌سازی کردن یک توربین بادی گشتاور تولیدی در سرعت‌های مختلف توسط توربین برای اعمال به ماشین لازم است. گشتاور تولیدی توربین به شکل زیر مدل شده است:

$$T_a = \frac{P_m}{\omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 C_p v^3}{\omega_t} \quad (3)$$

که با استفاده از رابطه‌ی ۲ و $\frac{C_p}{\lambda} = C_t$ به صورت

زیر در خواهد آمد:

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi C_t R^3 v^2 \quad (4)$$

که در اینجا T_a گشتاور در شافت توربین است و با بلوک دیاگرام شکل (۵) همواره تعیین شده و به ماشین اعمال می‌شود.

$$\omega_{1(opt)} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v_w = 1.9588 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$1.9588 \left[\frac{rad}{s} \right] = 1.9588 \times \frac{60}{2\pi} [r.p.m.] = 18.7 [r.p.m.]$$

منطقی است که نسبت تبدیل سرعت در جعبه دنده طوری انتخاب شود که در سرعت متوسط باد ژنراتور با سرعتی نزدیک به سرعت سنکرون خود بچرخد. البته اگر مقدار کمی از سرعت سنکرون بالاتر باشد بهتر است زیرا در این وضعیت کانورترهای طرف روتور توان نسبی فوق العاده کمی را مبادله خواهند کرد و در نتیجه تلفات بسیار کمی نیز خواهند داشت. که در اینجا نسبت تبدیل سرعت در جعبه دنده $n = 98$ در نظر گرفته شده است. تا به ازای سرعت متوسط در سایت، سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیم انرژی از باد، کمی بیشتر از سرعت سنکرون شود $(98 \times 18.7 = 1833 \geq 1800)$

اگر با تغییر سرعت باد، رابطه‌ی بهینه بین سرعت توربین و سرعت باد باقی بماند، دریافت ماکزیم توان از باد تضمین خواهد شد. به ازای سرعت‌های باد $4 m/s$ و $12 m/s$ ماکزیم توان تقریباً $\omega_{sync} (1 \pm 50\%)$ بدست می‌آید که در واقع محدوده‌ی تغییرات سرعت است. برای سرعت‌های بالاتر از $12 m/s$ کنترلر زاویه‌ی پره فعال خواهد شد. چون در غیر اینصورت ژنراتور و کانورترها *Overload* خواهند شد. شایان ذکر است که ژنراتور قدرت نامی (1.65 MW) خود را در سرعت باد $12 m/s$ تحویل می‌دهد و در سرعت‌های پایینتر توان تحویلی کمتر است، مثلاً در سرعت متوسط سایت $8 m/s$ ماکزیم توان مکانیکی تحویلی توربین به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$P_m = \frac{1}{2} \pi \times 1.25 \times 33^2 \times 8^3 \times 0.457 = 500 \text{ kw}$$

که بعد از ضرب شدن در بازده ژنراتور و قسمت‌های

زاویه ای روتور به صورت زیر با هم ارتباط دارند:

$$J_R \frac{d\omega_r}{dt} = T_g - T_{em} \quad (9)$$

$$J_R = \left(\left(\frac{1}{n} \right)^2 J_T + J_M \right) \quad (10)$$

که در این روابط، JR ترکیب اینرسی ماشین و توربین است که به طرف شافت ماشین منتقل شده است، JT اینرسی توربین، JM اینرسی ماشین و n نیز نسبت تبدیل سرعت در جعبه دنده می باشد. [6]

کنترل برداری

اگر دستگاه مرجع گردان را طوری انتخاب کنیم که محور d آن همواره در راستای بردار میدان استاتور باشد در آن صورت:

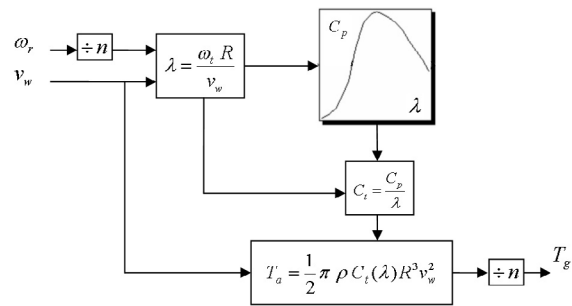
$$\lambda_{qs}^e = \frac{d\lambda_{qs}^e}{dt} = 0 \quad (11)$$

بالا نویس e معرف دستگاه مرجع گردان با سرعت سنکرون است.

دامنه و فرکانس ولتاژ استاتور به وسیله ی شبکه ثابت نگه داشته می شود، اگر مقاومت استاتور به اندازه ای کوچک باشد که افت ولتاژ آن در مقایسه با ولتاژ شبکه قابل چشم پوشی باشد، می توان نتیجه گرفت که میدان استاتور نیز ثابت باقی خواهد ماند، و احتیاجی به مجزاساز¹¹ نیست پس:

$$\lambda_{ds}^e = \lambda_s = cte \Rightarrow \frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} = 0 \quad (12)$$

با توجه به این روابط گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو را به صورت ساده شده ی زیر می توان نوشت:



شکل (5): مدل دینامیکی توربین بادی

ذکر این نکته ضروری است که در اینجا ω_t و Ta در قسمت سرعت پایین جعبه دنده می باشند که در نهایت Ta محاسبه شده برای انتقال به طرف روتور ژنراتور القایی (طرف سرعت بالای جعبه دنده) باید بر نسبت تبدیل سرعت، تقسیم شود.

معادلات ماشین

مدل ماشین القایی در دستگاه dq گردان با سرعت ω و پس از کنار گذاشتن مؤلفه ی صفر به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \\ v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_{qr} &= r_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \\ v_{dr} &= r_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

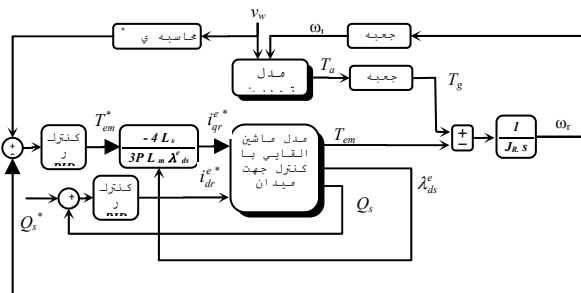
$$\begin{aligned} L_s &= L_{ls} + L_m & L_s &= L_{ls} + L_m \\ T_{em} &= \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Q_s &= \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \\ &= \frac{3}{2} \omega (\lambda_{ds} i_{ds} + \lambda_{qs} i_{qs}) \end{aligned} \quad (8)$$

گشتاور بسط داده شده در شافت ژنراتور و سرعت

11. decoupler

راحتی جواب خواهند داد. نتایج شبیه سازی بدست آمده از اعمال این کنترلرها قابل قبول است. البته چون سیستم بسیار غیر خطی است و تغییرات نقطه‌ی کار تأثیرات جزئی بر پارامترهای کنترلر دارد، استفاده از کنترلرهای فازی یا کنترل تطبیقی، قابلیت اطمینان را بیشتر می‌کند. [۷].



شکل (۶): طرح کلی سیستم کنترل

شایان ذکر است که در همه‌ی مراحل شبیه سازی سرعت باد در محدوده‌ی کمتر از 12 m/sec در نظر گرفته شده است و بنابراین $\theta = 0$ می‌باشد. اگر θ صفر نباشد، باید در محاسبه‌ی Ta از مدل توربین و ω^* از سرعت باد، محدودیت‌ها رعایت شوند.

برای افزایش سرعت انجام محاسبات که در سیستمهای بزرگ دارای اهمیت است، کاهش پیچیدگیهای مدل سازی و کاهش تعداد داده‌های سیستم، فرضیات زیر اعمال شده است:

- همه‌ی جرم‌های گردان به وسیله‌ی یک جرم مدل شده اند که توده جرم J نامیده می‌شود.
- الاستیک شافتها و نیروهای پیچشی منتهجه نادیده گرفته شده اند.
- از اشباع مغناطیسی در *DFIG* صرفنظر شده و توزیع شار سینوسی است.
- اینورتر به صورت ایده‌آل مدل شده است و پدیده‌های دینامیکی در آن در نظر گرفته نشده است.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{ds}^e i_{qs}^e = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s} \lambda_{ds}^e i_{qr}^e \quad (13)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \omega \lambda_{ds}^e i_{ds}^e = \frac{3}{2} \omega \lambda_{ds}^e \left(\lambda_{ds}^e - \frac{L_m i_{dr}^e}{L_s} \right) \quad (14)$$

ملاحظه می‌شود در صورتیکه λ_{ds}^e ثابت بماند، با کنترل مؤلفه‌های d و q از جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون (i_{qr}^e و i_{dr}^e)، می‌توان به صورت مستقل از همدیگر توان راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی را کنترل کرد. [۸]

برای انتقال کمیتها به دستگاه مرجع مورد نظر و محاسبه‌ی مقادیر گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو ماشین، به اندازه و موقعیت زاویه‌ای میدان استاتور احتیاج است که به صورت زیر تخمین زده می‌شوند:

$$v_{ds}^e = \frac{r_s}{L_s} (\lambda_{ds}^e - L_m i_{dr}^e) + \frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} \quad (15)$$

$$\Rightarrow \lambda_{ds}^e = \frac{\tau_s v_{ds}^e + L_m i_{dr}^e}{1 + p\tau_s}$$

$$v_{qs}^e + \frac{r_s L_m i_{qr}^e}{L_s} \quad (16)$$

$$\omega_e = \frac{v_{qs}^e + \frac{r_s L_m i_{qr}^e}{L_s}}{\lambda_{ds}^e}$$

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt + \theta_0$$

که $\tau_s = \frac{L_s}{r_s}$ ثابت زمانی مدار استاتور بوده و p نیز اپراتور دیفرانسیل است.

طرح کلی سیستم کنترل

طرح کلی سیستم کنترل در شکل (۶) نشان داده شده است. مدل ماشین در دستگاه مرجع سنکرون با جهت یابی میدان استاتور می‌باشد که λ_{ds}^e ، T_{em} و Q طبق روابط موجود تعیین می‌شوند.

چون در حالت ماندگار مؤلفه‌های مولد از جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون، *DC* هستند و فاقد فاز و فرکانس، بنابراین کنترلرهای *PID* در اینجا به

نتایج شبیه سازی

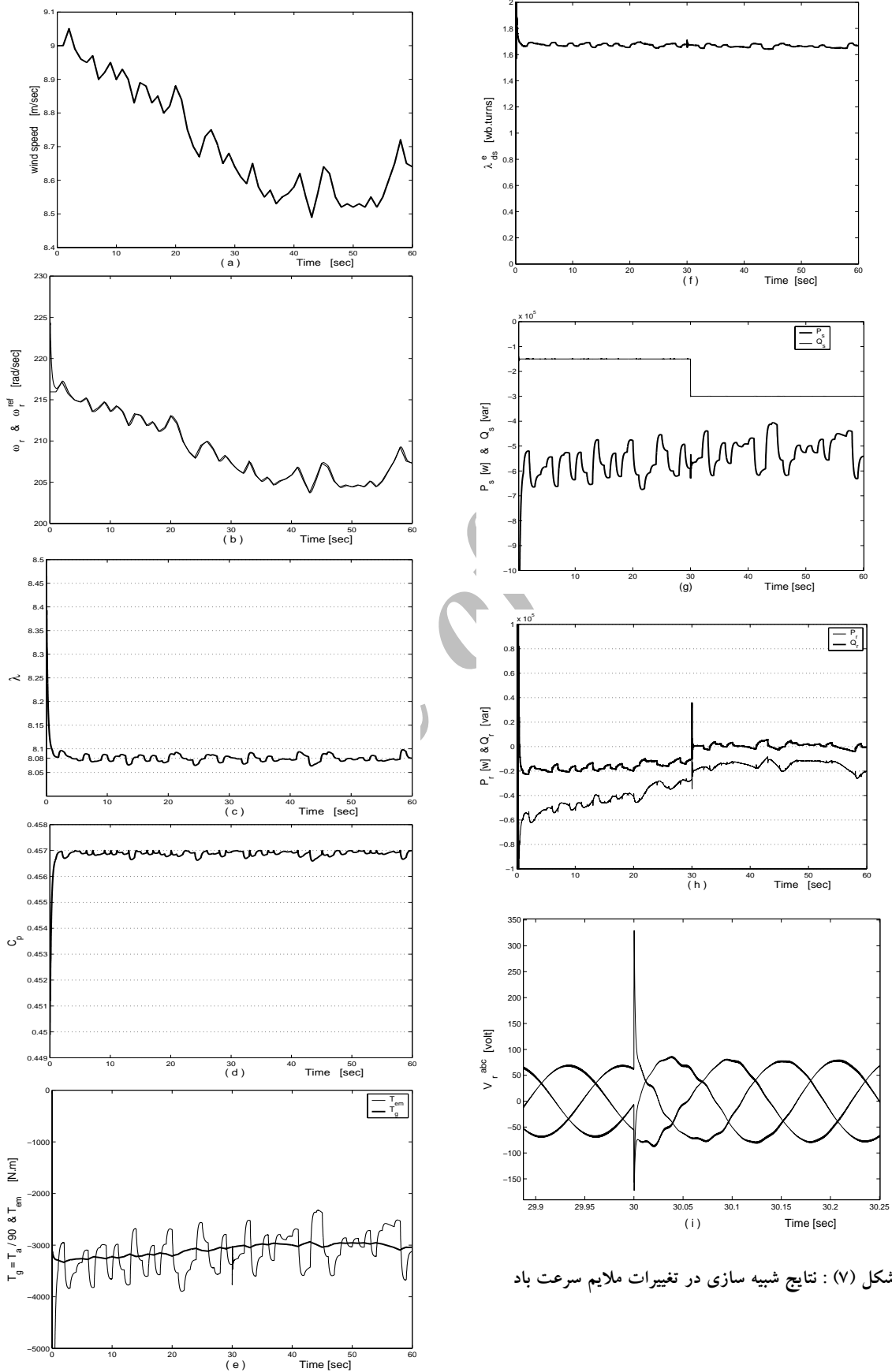
هزینه المانهای الکترونیک قدرت نیز مستقیماً متناسب با توان آنها است، پس برای برآورد هزینه باید قدرت کانورتر را مد نظر گرفت. عاملی که تاثیر بسیار زیادی بر قدرت کانورتر (در واقع توان انتقالی یا تزریقی از روتور) دارد، محدوده تغییرات سرعت می‌باشد. با شبیه سازی نشان داده شده است که اگر سرعت در رنج کوچکی در اطراف سرعت سنکرون تغییر کند، قدرت مورد نیاز کانورتر در مقایسه با قدرت ژنراتور، مقدار کوچکی خواهد بود [۹]. اگر محدوده ی تغییرات سرعت $\pm 30\%$ از سرعت سنکرون باشد، اندازه ی کانورتر تقریباً $\frac{1}{5}$ ظرفیت ماشین خواهد بود. در این شبیه سازی با توجه به تغییرات کم سرعت از سرعت سنکرون (در بدترین حالت $+15\% \omega_{sync}$)، توانهای اکتیو و راکتیو روتور نسبت به توان تولیدی ژنراتور بسیار کوچک می‌باشند.

ولتاژ اعمالی به روتور که از طریق یک کانورتر ایده آل اعمال شده است در قسمت (i) آمده است. در شکل (۸) نتایج شبیه سازی برای یک الگوی دیگر از سرعت باد که دارای تغییرات شدیدتری است، برای حصول اطمینان از کارایی سیستم کنترل آورده شده است. در اینجا تغییرات سرعت باد در طول 60 ثانیه 3 متر بر ثانیه است و متناظر با آن تغییرات سرعت روتور به 30% سرعت سنکرون رسیده است. توانهای اکتیو و راکتیو و ولتاژ اعمالی به روتور جالب توجه هستند. در سرعتهای بالاتر باد با توجه به افزایش توان تولیدی و در نتیجه جریان استاتور ژنراتور، افت ولتاژ مقاومت استاتور افزایش یافته و میدان استاتور دیگر ثابت باقی نخواهد ماند، که این نیز باعث بوجود آمدن تغییرات بیشتری در کمیت‌های کنترل شده می‌شود.

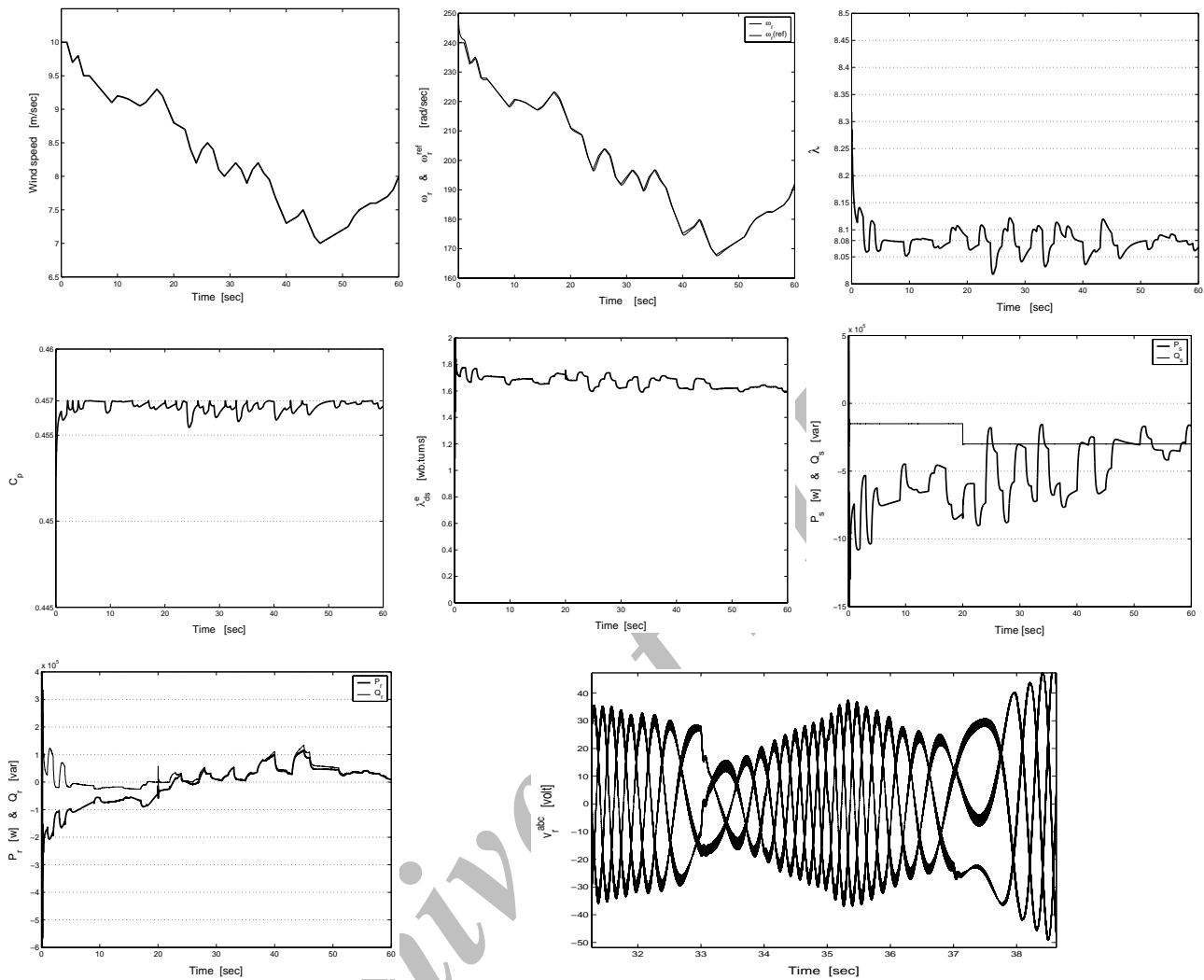
نتایج شبیه سازی کامپیوتری که در نرم افزار MATLAB و محیط سیمولینک انجام شده است، در شکل (۷) آمده است. سرعت باد به عنوان ورودی اصلی سیستم مطابق قسمت (a) می‌باشد که با الگوهای تعیین شده برای سرعت باد در سایر مقالات هماهنگی دارد. سرعت مرجع متناظر با این الگوی سرعت باد، برای دریافت ماکزیمم توان و سرعت واقعی روتور در قسمت (b) آورده شده است. توانایی سیستم کنترل در دنبال کردن تغییرات سرعت مرجع کاملاً مشهود است. C_p و λ نیز در قسمتهای (c) و (d) نشان داده شده اند که λ بر روی مقدار بهینه ی 8.08 و C_p نیز در مرز مقدار ماکزیمم 0.457 دارای تغییرات جزئی هستند.

گشتاور الکترومغناطیسی (T_{em}) و گشتاور شافت ژنراتور (T_g) (خروجی مدل توربین با توجه به الگوی سرعت باد)، در قسمت (e) ملاحظه می‌شود. میدان استاتور در قسمت (f) آمده است که طبق فرضیات قبلی تقریباً بدون تغییر باقی مانده است. توانهای اکتیو و راکتیو استاتور و روتور در قسمتهای (g) و (h) رسم شده اند. مقدار مرجع توان راکتیو استاتور دارای تغییر پله ای در $t=20 \text{ sec}$ از 150 kvar به 300 kvar می‌باشد و به صورت کاملاً مستقل از توان اکتیو کنترل شده است. توان اکتیو نیز تابع سرعت باد است. شایان ذکر است که در مواقع تغییر سرعت توربین با توجه به اینرسی بالای سیستم، تغییرات انرژی جنبشی آن بر توان اکتیو تاثیر خواهد گذاشت. [۹]

اما مهمتر از همه شاید توانهای اکتیو و راکتیو روتور باشد، زیرا این توان در واقع همان توان کانورترهای بین روتور و شبکه می‌باشد. این طرح در صورتی از نظر اقتصادی نیز قابل توجه است که هزینه کانورتر در مقایسه با هزینه ژنراتور زیاد نباشد و چون



شکل (۷): نتایج شبیه سازی در تغییرات ملایم سرعت باد



شکل (۸): نتایج شبیه سازی در تغییرات زیاد سرعت باد

نتیجه گیری

ژنراتورهای القایی با تغذیه ی دابل جهت کار در نیروگاههای بادی و دریافت ماکزیمم انرژی از باد بسیار مناسب هستند. با استفاده از دو کانورتر در طرف روتور که قدرت آنها در محدوده ی تغییرات کم سرعت در مقایسه با ژنراتور بسیار کوچک است، می‌توان ژنراتور را با دقت بالا کنترل کرد. حتی در تغییرات زیاد سرعت باد نیز عمل ردیابی سرعت به خوبی انجام شده است. توان راکتیو برای رسیدن به اهداف مورد نظر به صورت کاملاً مستقل قابل کنترل است.

ضمیمه ی (الف)

پارامترهای ماشین القایی و توربین بادی شبیه سازی شده به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 V_{L-L} &= 480 \text{ v} & P_t &= 1.65 \text{ MW} \\
 f &= 60 \text{ Hz} & \rho &= 1.25 \text{ kg / m}^3 \\
 P &= 4 & R &= 33 \text{ m} \\
 r_s &= 0.029 \Omega & J_T &= 25 \times 10^6 \text{ kg.m}^2 \\
 r_r &= 0.022 \Omega & n &= 98 \\
 L_s &= 0.0422 \text{ H} \\
 L_r &= 0.0422 \text{ H} \\
 L_m &= 0.0415 \text{ H} \\
 J_M &= 63.87 \text{ kg.m}^2
 \end{aligned}$$

منابع و مأخذ

1. Alan Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini "ADAPTIVE CONTROL OF VARIABLE SPEED WIND TURBINES" International Journal of Energy Research, 2001
2. J.G. Sloopweg, H. Polinder, W.L. Kling, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator", IEEE, 2001 pp 644-649
3. Mistutoshi Yamamoto and Osamu Mtoyoshi, "Active and Rective power control for Doubly- Fed wound Rotor Induction generator", IEEE Trans. on Power Electroincs, Vol.6 , No.4 , October 1991, PP.624-629
4. W.Hofmann, "Optimal reactive power splitting in wind power plants controlled by double-fed induction generator" IEEE, 1999, pp 943-948
5. Andreas Petersson, "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines" Department of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden 2003
6. Chee-Mun.Ong, " Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink ", 1998, PRINTICE HALL
7. R. Hoffmann; P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines", 2000 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 08-Ott. 12,2000, paper 23-01,
8. Yifan Tang and Longya Xu, "stator Field Oriented control of Doubly-Exited Induction machine in wind power Generating system", IEEE, 1993, 35th Midwest Symposium.

9. سعید لسان، هادی طاریمرادی " کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو در ژنراتورهای القایی با تغذیه دوپل متصل به شبکه " کنفرانس بین المللی برق ۱۳۸۱ تهران
۱۰. سعید لسان، هادی طاریمرادی، " کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو در ژنراتورهای القایی روتور سیم پیچی شده متصل به شبکه " پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه مازندران، ۱۳۸۰