

مدلسازی ، شبیه سازی و کنترل نیروگاه بادی ایزوله از شبکه

احسان میرزازادی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

E-mail: ehsan_mirzazadi@yahoo.com

چکیده - نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی و بحث آلودگی محیط زیست و نیز هزینه بالای استفاده از سوخت های فسیلی توجه مهندسان برق را بیش از پیش به استفاده از انرژی های نو معطوف نموده است. انرژی باد ارزان ترین و مناسب ترین شکل انرژی های نو می باشد و امروزه تقریباً در حدود 50000 توربین بادی در سراسر جهان بیش از 240000 مگاوات انرژی الکتریکی تولید می کنند. به منظور شبیه سازی کامپیوتری و تحلیل نحوه عملکرد و کنترل سیستم های بادی وجود مدل دقیقی از هر یک از اجزای تشکیل دهنده ضروری است. در این مقاله ابتدا به مدلسازی یک توربین بادی پرداخته و سپس توسط نرم افزار *Simulink* شبیه سازی و کنترل یک سیستم بادی ارائه می گردد.

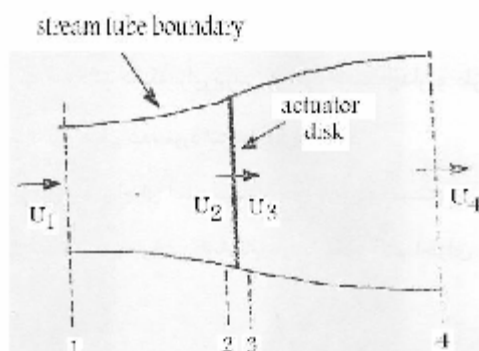
کلید واژه- توربین باد محور افقی ، جریان های گردشی باد ، مدل Betz ، نیروی پیشران ، نیروی *drag/lift*

1- مقدمه

2- مدلسازی توربین بادی [2]

2-1- مدل توربین ایده آل

در این مدل که در شکل (1) نیز آمده است ، فرض بر اینست که کشش اصطکاکی وجود ندارد ، تعداد پره ها نامحدود است و نیروی پیشران (*Thrust Force*) در تمام فضای روتور یکسان است ؛ همچنین جریان حلقوی پره ها در نظر گرفته نشده است.



توربین های بادی بر اساس محور چرخش پره ها به دو دسته تقسیم می شوند. دسته نخست که توربین های بادی محور افقی (*Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*) نامیده می شوند ، دارای محور چرخش موازی سطح زمین می باشند. شکل بوجود آمده از چرخش پره ها دایره ای شکل بوده و در باد هایی که جهت وزش آنها موازی با سطح زمین نیست ، نیازمند سیستم دوران پره ها حول محور قائم هستند. دسته دوم توربین های بادی محور قائم (*Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*) می باشند که در آن ها محور چرخش عمود بر سطح زمین است. مزیت مهم این نوع توربین این است که به جهت وزش باد حساس نبوده و در هیچ شرایطی به سیستم دوران پره ها حول محور قائم نیاز ندارد.

این مقاله بطور خاص به توربین های بادی از نوع *HAWT* اشاره دارد.

شکل 1: مدل توربین ایده آل ارائه شده توسط Betz در سال 1926 میلادی

در این مدل فرض بر اینست که سرعت زاویه ای جریان هوا (Ω) در مقایسه با سرعت زاویه ای روتور توربین (Ω) کوچک است؛ بنابراین می توان فرض کرد درحالیکه مؤلفه های محوری سرعت ثابت باقی می ماند، سرعت زاویه ای هوا متناسب با سرعت پره ها از Ω به $\Omega + \omega$ افزایش می یابد. همچنین مانند بخش قبل تعداد پره ها را نامحدود در نظر می گیریم.

ضریب القای چرخشی را به شکل زیر تعریف می کنیم:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (5)$$

پس نیروی پیشران جزئی عبارتست از:

$$dT = 4a'(1+a')\frac{1}{2}r\Omega^2r^22prdr \quad (6)$$

از طرفی:

$$dT = 4a(1-a)\frac{1}{2}rU^22prdr \quad (7)$$

با توجه به عبارات (6) و (7) داریم:

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \frac{\Omega^2r^2}{U^2} = I_r^2 \quad (8)$$

که در آن I_r بعنوان نسبت سرعت نوک محلی تعریف می گردد.

نسبت سرعت نوک (I) بنا به تعریف برابر با نسبت سرعت نوک پره ها به سرعت باد است:

$$I = \frac{\Omega R}{U} = I_r(r=R) \quad (9)$$

با توجه به روابط (8) و (9) واضح است که:

$$I_r = \frac{\Omega r}{U} = \frac{I \cdot r}{R} \quad (10)$$

المان جزئی گشتاور روتور برابر است با:

$$dQ = [4a'(1-a)]\frac{1}{2}rU\Omega r^2(2prdr) \quad (11)$$

توان تولید شده توسط المان جزئی گشتاور عبارتست از:

$$dP = \Omega dQ = \frac{1}{2}rAU^3\left[\frac{8}{I^2}a'(1-a)I_r^3dI_r\right] \quad (12)$$

از آنجائیکه در هیچ یک از دو طرف دیسک کاری صورت نمی گیرد، بنابراین تابع برنولی در هریک از دو طرف دیسک ثابت مانده و داریم:

$$\begin{cases} P_1 + \frac{1}{2}rU_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}rU_2^2 \\ P_3 + \frac{1}{2}rU_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}rU_4^2 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن چگالی هوا و P_i و U_i نیز به ترتیب فشار و سرعت هوا در نقاط نظیر آن ها در شکل (1) هستند.

در این مدل ساده توان خروجی توربین برابر خواهد بود با:

$$P = \frac{1}{2}rAU_1^3[4a(1-a)^2] \quad (2)$$

که از روی آن می توان پارامتر ضریب توان را که بیانگر میزان کارایی توربین باد است، به شکل زیر تعریف کرد:

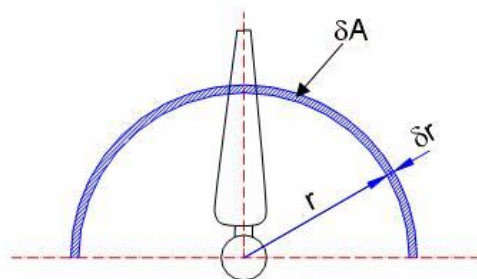
$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (3)$$

پارامترهای A و U_1 نیز به ترتیب سطح جاروب شده توسط روتور (سطح $actuator\ disk$) و سرعت باد در محل توربین می باشند.

همچنین در روابط فوق پارامتر a به عنوان ضریب القای محوری یعنی نسبت کاهش سرعت باد میان هوای آزاد و سطح روتور تعریف می گردد:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (4)$$

2-2- توربین بادی محور افقی با جریان حلقوی پره ها



شکل 2: المان جزئی سطح در فاصله r از مرکز توربین

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin j} \quad (17)$$

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} r U_{rel}^2 c dr \quad (18)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} r U_{rel}^2 c dr \quad (19)$$

که در آن c عرض هریک از پره ها و C_L و C_D نیز به ترتیب ضرایب $lift$ و $drag$ می باشند.

اگر تعداد پره های روتور را B در نظر بگیریم ، مجموع نیروی نرمال برای هریک در فاصله r از مرکز به فرم زیر خواهد بود :

$$dF_N = B \frac{1}{2} r U_{rel}^2 (C_L \cos j + C_D \sin j) c dr \quad (20)$$

دیفرانسیل گشتاور نیز که متناسب با نیروی مماسی عمل می کند ، در فاصله r از مرکز عبارتست از :

$$dQ = B.r.dF_T \quad (21)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} r U_{rel}^2 (C_L \sin j - C_D \cos j) c r dr \quad (22)$$

2-4- روابط کامل مدل توربین (با جریان های گردشی باد)

روابط مدل توربین بر اساس ضرایب القا (a, a') به فرم زیر می باشند :

$$dT = 4a(1-a)rU^2 pr dr \quad (23)$$

$$dQ = 4a'(1-a)rU pr^3 \Omega dr \quad (24)$$

با تعریف پارامتر S' بنام سختی محلی ($Local Solidity$) و با توجه به رابطه (17) خواهیم داشت :

$$S' = \frac{Bc}{2pr} \quad (25)$$

$$dF_N = S' pr \frac{U^2(1-a)^2}{\sin^2 j} (C_L \cos j + C_D \sin j) r dr \quad (26)$$

$$dQ = S' pr \frac{U^2(1-a)^2}{\sin^2 j} (C_L \sin j - C_D \cos j) r^2 dr \quad (27)$$

ضریب توان نیز با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود :

در مورد المان جزئی ضریب توان خواهیم داشت :

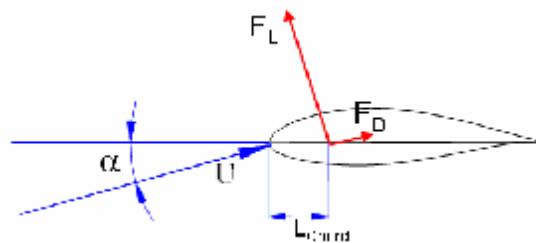
$$dC_P = \frac{dP}{\frac{1}{2} r A U^3} \quad (13)$$

بنابراین با انتگرالگیری داریم :

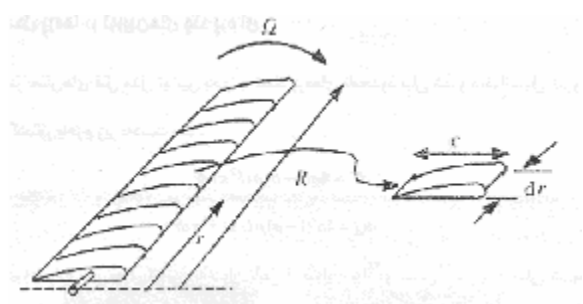
$$C_P = \frac{8}{I^2} \int_0^I a'(1-a) I_r^3 dI_r \quad (14)$$

2-3- مدل پره ها در توربین های چند پره ای

همانطور که در شکل (3) مشاهده می گردد ، نیروهای وارد بر پره های توربین حاصل جمع برداری نیروهای $lift$ ($force$) و کشش ($drag force$) می باشد.



شکل 3: نیروهای $lift$ و $drag$ وارد بر هریک از پره های توربین از طرف باد در حال وزیدن



شکل 4: المان جزئی در طول هریک از پره های توربین بادی [1]

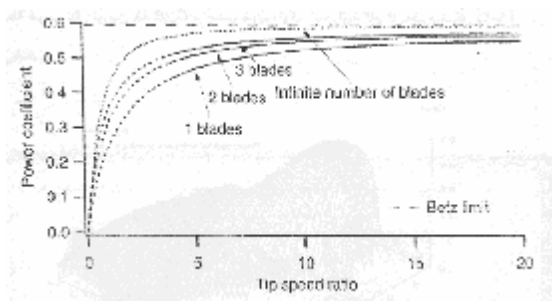
زاویه سرعت نسبی باد برابر با مجموع زاویه گام هر بخش و زاویه اصابت باد است :

$$j = q_P + a \quad (15)$$

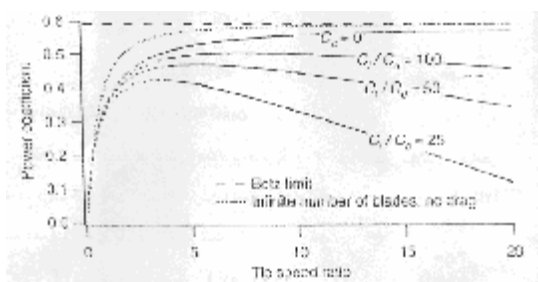
با در نظر گرفتن U_{rel} به عنوان سرعت نسبی باد ، روابط زیر را نتیجه می گیریم :

$$\tan j = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')I_r} \quad (16)$$

مختلف این پارامترها رسم شده است.



شکل 5: منحنی $C_p - I$ و تأثیر تعداد پره ها بر ضریب توان [1]



شکل 6: منحنی $C_p - I$ و تأثیر C_L/C_D بر ضریب توان [1]

3- شبیه سازی نیروگاه بادی

در ادامه توسط نرم افزار *MATLAB* و با استفاده از *Simulink* به شبیه سازی یک نیروگاه بادی کوچک مستقل از شبکه پرداخته ایم.

همانطور که در دیاگرام بلوکی شکل شماره (7) مشاهده می شود ، مدل شبیه سازی شده شامل یک بلوک *Asynchronous Generator* بوده که انرژی الکتریکی مجموعه را تأمین می نماید. این ژنراتور به یک توربین باد بطور مکانیکی کوپل شده است و سرعت باد نیز ثابت در نظر گرفته شده است؛ بلوک *PF Correction Capacitor* ، ضریب توان مجموعه را اصلاح نموده و *Synchronous Condenser* نیز با ترکیب خاصی که مورد استفاده قرار گرفته ($P_m = 0kW$) ، تأمین کننده توان راکتیو شبکه است [3]. شبکه دارای سه مجموعه بار کلی است ؛ یکی *Main Load* برابر $50kW$ و دیگری *Load* برابر $25kW$ است که پس از اندک زمانی (دو دهم ثانیه) به شبکه وصل می گردد. این دو به همراه هم *Consumer Load* (بار اصلی کلی) را می سازند. مجموعه بار سوم (*Secondary Load*) باری است متغیر که به فرکانس شبکه حساس است ؛ بنابر این در

$$C_P = \frac{8}{I^2} \int_{I_h}^I \left\{ I_r^3 a'(1-a) [1 - (C_D/C_L) \cot j] \right\} dI_r \quad (28)$$

که در آن I_h نسبت سرعت نوک محلی بر روی هاب است.

همچنین می توان نوشت :

$$C_P = \frac{8}{I^2} \int_{I_h}^I \sin^2 j . I_r^2 (\cos j - I_r \sin j) . (\sin j + I_r \cos j) [1 - (C_D/C_L) \cot j] dI_r \quad (29)$$

این معادلات معمولاً بصورت عددی حل می شوند. رابطه ضریب توان پس از انتگرال گیری به شکل زیر خواهد بود :

$$C_P = \frac{8}{3} AC \left[I - \frac{I_h^3}{I^2} \right] + 2BC \left[I^2 - \frac{I_h^4}{I^2} \right] - \frac{8}{5} AC \left[I^3 - \frac{I_h^5}{I^2} \right] \quad (30)$$

که $B = \sin^2 j . \cos^2 j - \sin^4 j$ ، $A = \sin^3 j . \cos j$

$$j = q_P + a \text{ و } I = \frac{R\Omega}{U} , C = 1 - \frac{C_D}{C_L} . \cot j$$

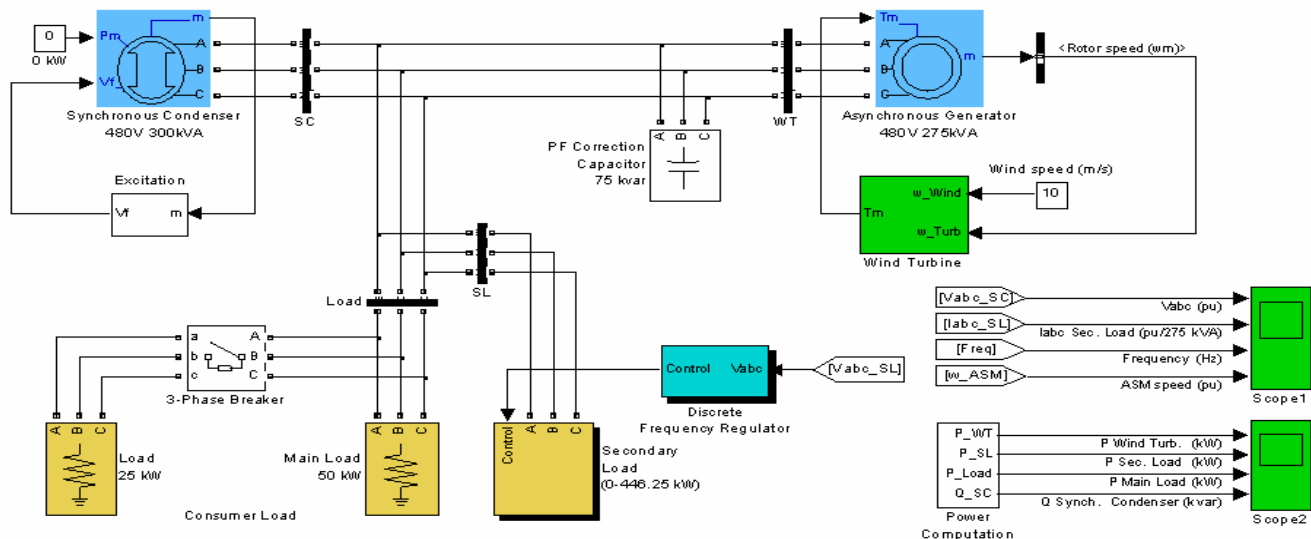
2-5- اثر تعداد پره ها بر عملکرد بهینه توربین بادی

تلفات نوک و کشش هوا تابعی از تعداد پره ها می باشد که ضریب توان توربین را کاهش می دهد. ماکزیمم توان بدست آمده از توربین با تعداد پره های محدود و کشش جریان هوا به فرم زیر است :

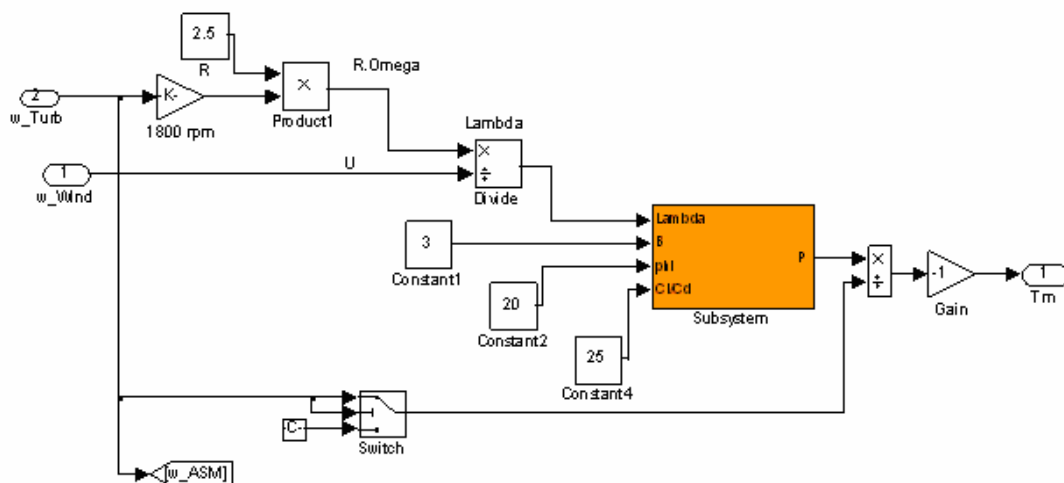
$$C_{P,max} = \frac{16}{27} I \left[1 + \frac{1.32 + \left(\frac{I-8}{20} \right)^2}{B^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - 2BC \left[\frac{0.57 I^2}{\frac{C_L}{C_D} \left(I + \frac{1}{2B} \right)} \right] \quad (31)$$

این رابطه برای مقادیر I بین 4 تا 20 ، C_L/C_D بین 25 تا ∞ و B (تعداد پره ها) بین 1 تا 3 صادق است.

در شکل های (5) و (6) ، منحنی $C_p - I$ برای مقادیر

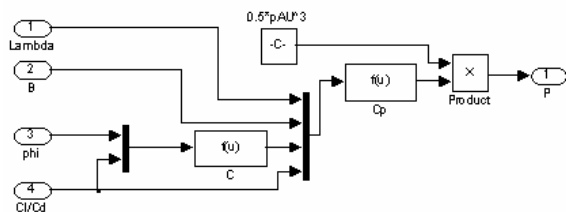


شکل 7: دیاگرام بلوکی شبیه ساز یک نیروگاه بادی مستقل از شبکه



شکل 8: محتویات بلوک Wind Turbine از شکل شماره (7)

مشاهده می شود که با استفاده از C_p/C_d و j ، مقدار C محاسبه شده و با استفاده از این مقدار و نیز C_p/C_d و B و I ، C_p و از آنجا P محاسبه خواهند شد. نتایج شبیه سازی در شکل (10) آمده است.

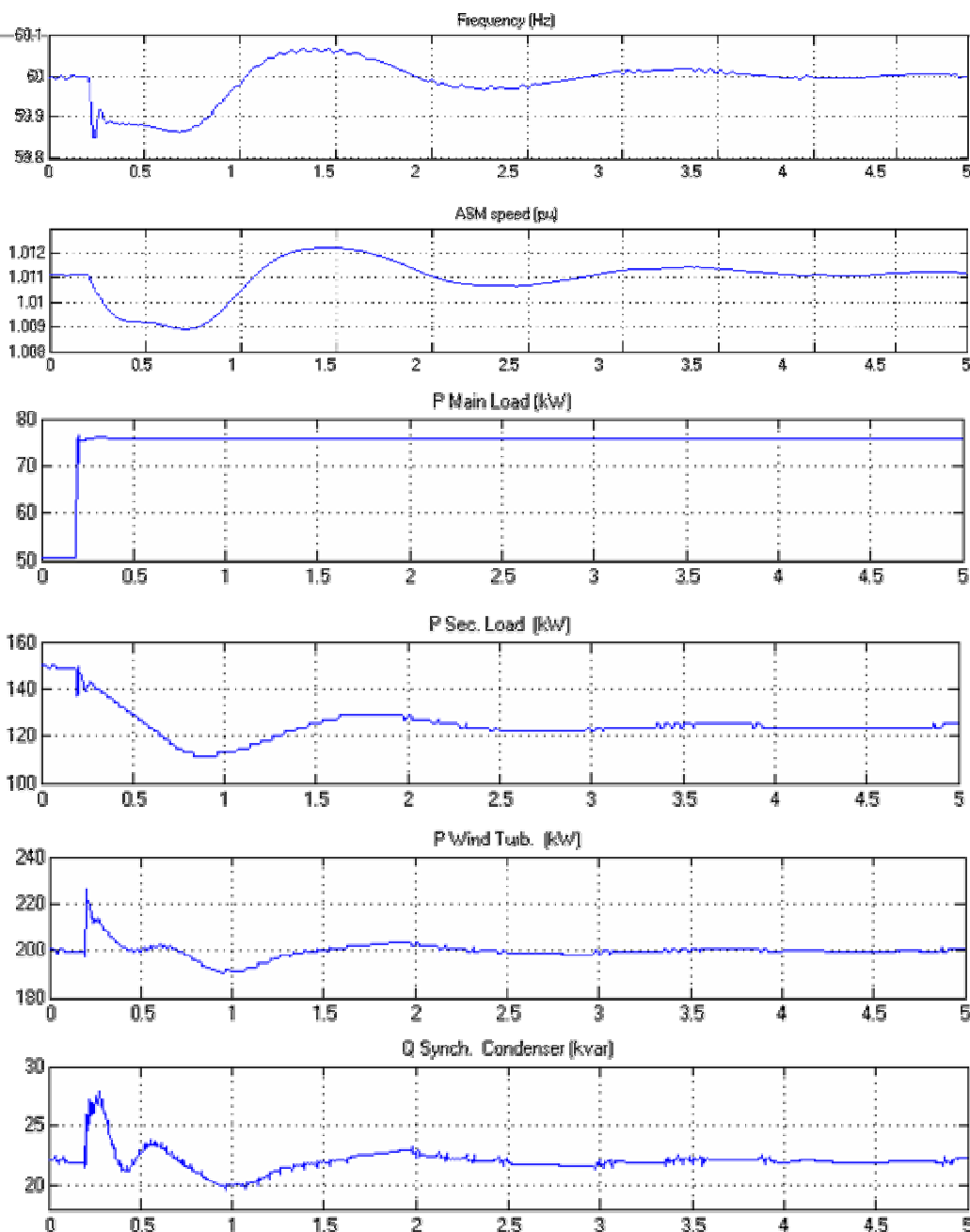


شکل 9: محتویات Subsystem از شکل شماره (8)

تغذیه آن از *Discrete Frequency Regulator* بهره برده ایم که مرتباً با بررسی ولتاژ V_{abc} ، تغذیه *Secondary Load* را کنترل می کند. دیاگرام بلوکی مورد استفاده شامل یک بخش *Power Computation* و یک بخش *Monitoring* نیز می باشد که در گوشه پایین سمت راست مشخص هستند.

در شکل (8)، درون بلوک *Wind Turbine* نمایان شده است. در این دیاگرام بلوکی با دریافت سرعت باد و نیز سرعت زاویه ای توربین بادی مقدار I محاسبه شده و با استفاده از بلوک *Subsystem* و اضافه شدن سه ورودی دیگر بلوک اخیر (تعداد پره ها، زاویه سرعت نسبی و نسبت C_p/C_d) به محاسبه T_m پرداخته ایم.

شکل (9) نیز بیانگر محتوای بلوک *Subsystem* است.



شکل 10: نتایج شبیه سازی

را به یکدیگر و حتی به شبکه سراسری متصل نماییم.

4- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به مدلسازی توربین باد که اصلی ترین بخش یک نیروگاه بادی است پرداختیم؛ سپس با استفاده از *Simulink* آن را به یک ژنراتور آسنکرون کوپل نموده و مجموعه را کنترل نمودیم. تعدادی بار الکتریکی متفاوت در نظر گرفته و سیستم کنترل را طوری طراحی نمودیم تا در مدت زمان اندکی به شرایط مطلوب یعنی تأمین انرژی الکتریکی توسط سیستم بادی دست یابیم. پس از این مرحله و برای کنترل یک مزرعه بادی کافیت از سیستم- های کنترلی نظیر *DCS* و *Fieldbus* استفاده نموده و با تنظیم فرکانس و همفاز نمودن خروجی تمام توربین ها آنها

مراجع

- [1] مسعود سرگزی کوشه، شبیه ساز نیروگاه بادی، تز کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان 84
- [2] GoldBerg, David : “Wind Energy Explained: Theory , Design and application”, Prentice Hall, 2002
- [3] Stephen Chapman : “Electric Machinery Fundamentals”, Third Edition, McGRAW-HILL, 1999