



# Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolü ile çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması

## Individual pitch control on wind turbines with permanent magnet synchronous generator for reduction of mechanical load and stability of output power

Murat LÜY<sup>1\*</sup>, Zafer CİVELEK<sup>2</sup>, Ertuğrul ÇAM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.  
mluy@kku.edu.tr, cam@kku.edu.tr

<sup>2</sup>Elektronik Bölümü, Meslek Yüksek Okulu, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye.  
zafercivelek@karatekin.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 10.08.2016

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.55822  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu makalede rüzgâr türbinlerinin çıkış gücü kalitesinin artırılması ve türbin üzerindeki mekanik yüklerin hafifletilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Nominal rüzgâr hızlarının üzerinde kanat hatve açısı ayarlanarak rüzgâr türbininin çıkış gücü nominal değerde tutulmuştur. Ayrıca bireysel hatve açısı kontrolü ile de rüzgâr türbini üzerindeki mekanik yükler azaltılmıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratör kullanılan rüzgâr türbini Matlab/Simulink'de modellenmiştir. Simülasyon sonuçları, bireysel hatve açısı kontrolü ile rüzgâr türbininin hem çıkış gücü kalitesinin sağlandığını hem de rüzgâr türbini üzerindeki dengeli periyodik yüklerin azaltıldığını göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bireysel hatve açısı, rüzgâr türbini, kontrol, Çıkış gücü

### Abstract

In this article, increasing output power quality of wind turbines and decreasing mechanical loads on turbines was studied. By adjusting the blade pitch angle on nominal wind speed, output power of wind turbine kept on nominal value. Beside, by individual pitch angle control, mechanical loads on wind turbine was decreased. Wind turbine in which permanent magnet synchronous generator is used, modeled in matlab/simulink. Simulation results show that by individual pitch angle control both output power quality of wind turbine assured and balanced periodical loads on wind turbine reduced.

**Keywords:** Individual pitch control, Wind turbine, Control, Output power

## 1 Giriş

Rüzgâr türbinleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına son zamanlarda duyulan ilginin artmasıyla daha popüler bir hale gelmiştir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak rüzgâr türbinlerinin hem kapasitesi büyümüş hem de rüzgâr türbinlerinde kullanılan kontrol yöntemleri gelişmiştir.

Rüzgâr, değişken bir enerji kaynağı olduğundan, rüzgâr türbininden elde edilen enerji de değişkenlik arz etmektedir [1]. Rüzgâr hızı nominal rüzgâr hızının altında olduğu bölgelerde eğer mümkünse rüzgâr türbininde maksimum güç transferi yöntemleri uygulanarak, rüzgâr hızının nominal rüzgâr hızının üzerinde olduğu bölgelerde ise hatve açısı kontrolü yapılarak çıkış gücü nominal çıkış gücünde veya nominal çıkış gücüne en yakın değerlerde tutulmaya çalışılır.

Rüzgâr türbini hatve açısı kontrolünde birçok yöntem önerilmiştir. Bunlar Proportional-Integral-Derivative (PID) kontrol, Fuzzy Logic (FL) kontrol, Fuzzy-PID kontrol ve Yapay Sinir Ağları (YSA) ile kontrol gibi yöntemlerdir [2]-[5]. Bu yöntemlerin üstünlükleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [6]. Son zamanlarda, rüzgâr türbinlerinin fiziksel boyutlarının artması, türbinlerdeki mekanik yükleri düşünme gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca son zamanlarda üretilen türbinlerin bireysel hatve kontrolüne izin vermesi bireysel hatve açısı kontrol yöntemini mümkün kılmıştır. Türbinlerin daha büyük ve daha esnek olması mekanik yük azaltımının önemini arttırmaktadır. FL, YSA, Sezgisel Optimizasyon (SO) gibi

modern kontrol yöntemleri sayesinde mekanik yük azaltımı daha cazip hale gelmiştir. Geliştirilen yazılımlar ve sensörler, mekanik yüklerin araştırmacılar ve bilim insanları tarafından anlaşılmasını daha da kolaylaştırmıştır. Böylece araştırmacılara uygun kontrol algoritmalarının tasarımı için değişik metotlar geliştirme imkânı sunmuştur [7].

Enerji maliyetini azaltmak ve güç kalitesini arttırmak için çalışmalar yapılırken, kontrol sistemi sadece mümkün olan ideal güç eğrisini birebir takip edecek şekilde tasarlanmamalıdır. Diğer kontrol parametreleri de dikkate alınmalıdır [8],[9]. Bu parametrelerden bir tanesi de rüzgâr türbinindeki mekanik yüklerdir. Mekanik yükler çeşitli türbin parçaları üzerinde yorulmaya sebep olmaktadır. Bu yorulma sistemin faydalı ömrünü kısaltmakta, bu da rüzgâr türbininin ortalama maliyetinin artmasına ve enerji maliyetinin yükselmesine sebep olmaktadır [10].

E. Bossanyi'nin 2003 yılında yapmış olduğu çalışmasında rüzgâr türbinlerinin periyodik mekanik yüklerinden bahsedilmiştir. Üç kanatlı türbinlerde bu yükler arasında 120°'lik faz farkı vardır. Bu yükler çözüm olarak bireysel hatve açısı kontrolü tavsiye edilmiştir [7]. Yine E. Bossanyi'nin 2005 yılında yapmış olduğu çalışmada hatve açısı kontrolörüne ileri beslemeli bir filtre eklenerek, P harmonik sayısı olmak üzere 3P frekanslı yüklerin kompanzasyonu sağlanmıştır [11].

TJ. Larsen ve diğ. 2005 yılında yapmış olduğu çalışmasında yerel kanat akış ölçümü yöntemi kullanarak mekanik yük

azaltımının mümkün olduğu gösterilmiştir [12]. K. Selvam ve diğ. 2009 yılında yapmış olduğu çalışmada ise birbirinden bağımsız çok değişkenli Linear Quadratic Gaussian (LQG) ve Feedforward Disturbance Rejection Controller (FDRC) isimli iki kontrol yöntemi ile bireysel hatve açısı kontrolü yapılarak rüzgâr türbininin mekanik yükleri azaltılmaya çalışılmıştır [13]. Görüldüğü üzere, rüzgâr enerji sistemlerinde birçok kontrol tekniği uygulanmıştır. Ancak Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratörlerin (KMSJ) kullanıldığı çalışmaya pek rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmada KMSJ'li bir rüzgâr enerji sisteminde hatve açı kontrolü hem çıkış gücü kararlılığının iyileştirilmesi için hem de mekanik yük azaltımı amacıyla yapılmıştır. Literatür tarandığında her ikisinin aynı anda incelendiği çalışmaların azlığı ve KMSJ'li türbinlerde hatve kontrolünün bu şekilde hiç denenmemiş olması çalışmanın amacını ve üstünlüğünü oluşturmuştur. Çıkış gücü kararlılığı enerji ağına verilen gücün kalitesini artırırken, mekanik yüklerin azaltılması rüzgâr enerji sisteminin ömrünü uzatmaktadır. Rüzgâr enerji sisteminin faydalı ömrünün uzaması da enerji maliyetini düşürmektedir. Bu amaçla, KMSJ kullanan bir rüzgâr enerji sistemi Matlab/Simulink ortamında modellenirken, rüzgâr türbininin güç çıkışı ile mekanik yüklerin incelenip verilerinin Matlab'a aktarılabilirdiği Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence (FAST) Programı da modellemeye mekanik veri sağlamak için kullanılmıştır. Böylece her iki durum için de gerekli olan rüzgâr türbini hatve açısı kontrolü sağlanmıştır. Sonuçlar mekanik ve elektriksel yüklerin aynı anda kontrol edilebildiğini ve daha verimli bir sistemin ortaya çıktığını göstermektedir.

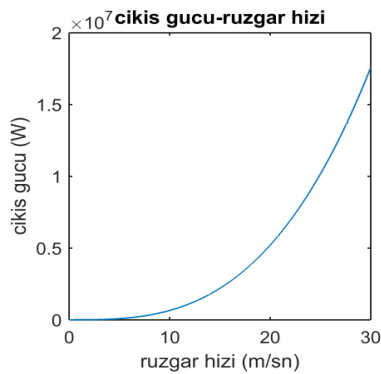
## 2 Materyal ve yöntem

### 2.1 Rüzgâr türbini modeli

Rüzgâr gücü ( $P$ ), Denklem (1)'de verilmiştir.

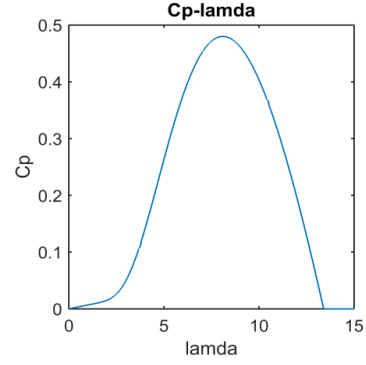
$$P = 0.5\rho Av^3 \quad (1)$$

Burada,  $\rho$ ,  $v$  ve  $A$ , sırasıyla hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ), rüzgâr hızı ( $\text{m/s}$ ) ve kanatlar tarafından süpürülen alandır ( $\text{m}^2$ ). Şekil 1'de rüzgâr hızı-rüzgâr gücü değişim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1: Rüzgâr hızı-rüzgâr gücü eğrisi.

Rüzgâr türbini, rüzgâr gücünün belirli bir kısmını enerjiye çevirebilir. Rüzgâr türbininin enerjiye çevirebildiği güç miktarı Betz limitini geçemez. Betz limiti 0.59 olduğundan dolayı, bir rüzgâr türbini rüzgâr gücünün en fazla %59'unu enerjiye çevirebilir [14]. Rüzgâr türbininden alınabilecek güç miktarı, güç katsayısı  $C_p$  tarafından belirlenir. Güç katsayısı  $C_p$  ise kanat hatve açısı  $\beta$  ve kanat uç hız oranı  $\lambda$ 'nın bir fonksiyonudur [15]. Şekil 2'de  $C_p$ 'nin,  $\lambda$ 'ya göre değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 2:  $C_p$ - $\lambda$  eğrisi.

Rüzgâr türbininden elde edilebilecek mekanik güç Denklem (2)'de verilmiştir.

$$P_{\omega t} = P C_p(\beta, \lambda) \quad (2)$$

Denklem (1) Denklem (2)'ye ilave edilirse;

$$P_{\omega t} = 0.5\rho Av^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (3)$$

Burada,  $C_p(\beta, \lambda)$ ,  $\beta$  ve  $\lambda$ , sırasıyla türbinin güç katsayısı, kanat hatve açısı ve kanat uç hız oranıdır (TSR).

Rüzgâr türbininin güç katsayısı  $C_p$ , Denklem (4)'te verilmiştir.

$$C_p = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (4)$$

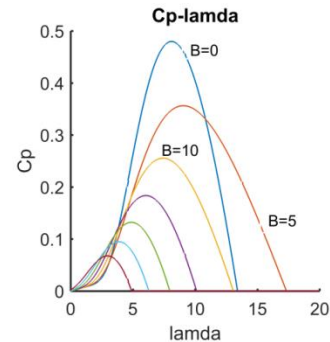
Denklem (5)'te verilen  $\lambda_i$  değeri, Denklem (4)'te kullanılarak  $C_p$  hesaplanır.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{3\beta + 1} \quad (5)$$

$\lambda$ , Denklem (6)'da verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\omega_{\omega t} R}{v} \quad (6)$$

Burada,  $\omega_{\omega t}$  ve  $R$  sırasıyla açısal hızı ( $\text{rad/s}$ ) ve kanat yarıçapıdır ( $\text{m}$ ). Şekil 3'te değişik beta açısı değerleri için güç katsayısı ve kanat uç hız oranı değişim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3: Farklı  $\beta$  değerleri için  $C_p$  -  $\lambda$  grafiği.

Aerodinamik tork birim açısal hız başına düşen güç miktarıdır [15]. Rotoru süren aerodinamik tork Denklem (7)'de verilmiştir.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (7)$$

Eğer Denklem (2)'yi Denklem (7)'de kullanırsak;

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} \quad (8)$$

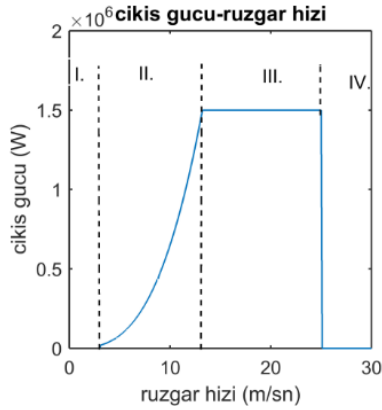
Denklem (8)'deki,  $C_p(\beta, \lambda)$  ve  $\lambda$  arasındaki oran yeni bir birimsiz parametredir ve tork katsayısı olarak bilinir. Bu değerle aşağıdaki eşitlikle açıklanır:

$$C_Q(\beta, \lambda) = \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} \quad (9)$$

Denklem (6)'ya göre  $\omega_{\omega t}$  veya  $v$  deki herhangi bir değişim,  $\lambda$ 'yı değiştirir. Bu da  $C_p$ 'yi değiştirir. Güç katsayısının değişiminin sonucu olarak rüzgârdan elde edilebilecek güç miktarı değişecektir.

Denklem (4) ve Denklem (5)'e göre  $C_p$ , güç katsayısının değişimi, hatve açısının değişimine de bağlıdır. Rüzgâr türbininin çıkış gücü kontrolü bu prensibe göre çalışır.

Rüzgâr hızı değişken olduğundan, türbinlerin çıkış gücü de değişkendir [17]. Şekil 4'te rüzgâr türbininin çeşitli çalışma bölgeleri görülmektedir.



Şekil 4. Rüzgâr türbininin çalışma bölgeleri.

Buna göre çalışma bölgeleri dörde ayrılmıştır. I. bölgedeki rüzgâr hızı değerleri rüzgâr türbinini çalıştırması ekonomik olmadığından, bu bölgede rüzgâr türbini çalıştırılmaz. Dolayısıyla 1. bölgede çıkış gücü sıfırdır. I. bölgeden II. bölgeye geçiş noktasındaki rüzgâr hızı değerine alt kesim noktası (cut-in) denir. Bu rüzgâr hızı değerinden sonra rüzgâr türbini çalışmaya başlar. II. bölge, alt kesim noktası ile nominal rüzgâr hızı arasındaki bölgedir. Burada üretilen güç miktarı nominal gücün altındadır. Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking - MPPT) bu bölgede yapılır. MPPT'de jeneratörün torku çeşitli güç elektroniği devreleri yardımıyla ayarlanarak rüzgâr türbini güç katsayısı  $C_p$  maksimum değerle tutulmaya çalışılır [16]. III. bölge nominal hızın üzerindeki rüzgâr hızları ile rüzgâr türbininin güvenlik açısından kapatıldığı üst kesim rüzgâr hızı (cut-out) arasındaki bölgedir. Bu bölgede hatve açısı kontrol edilerek rüzgâr türbininin çıkış gücü nominal değerde tutulmaya çalışılır [15]. Son bölge olarak da IV. bölgede rüzgâr türbini güvenlik açısından kapatılır.

## 2.2 Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratör modeli

Kalıcı mıknatıslar, 20. yüzyılın başlarında karbon çelik kalıcı manyetik malzemelerin keşfinden beri endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda ise Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makineler (KMSM), başlangıç maliyetinin düşük olması ve

basit yapısından dolayı birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Bunun birinci sebebi; düşük maliyetli güç elektroniği kontrol cihazlarının kullanılması ve kalıcı mıknatıslı karakteristiğinin iyileştirilmesidir. Genel olarak modern kalıcı mıknatıslı makineler birçok tipteki makine ile performans ve maliyet bakımından rekabet edebilmektedir [19].

KMSM'nin kararlı durum analizi, ters Elektromotor Kuvvetini (EMK) içeren armatür denklemlerinin kullanıldığı basit bir eşdeğer devre yardımıyla yapılabilir. Bu analizde doyum durumu, Eddy akımları ve histerisis kayıpları ihmal edilmiş, indüklenen emk'nın sinüzoidal olduğu ve alan akım dinamiğinin olmadığı kabul edilmiştir. Bu durumda KMSJ için voltaj denklemleri Denklem (10)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} u_{am} \\ u_{bm} \\ u_{cm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = (R_m + sL) \begin{bmatrix} i_{am} \\ i_{bm} \\ i_{cm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Burada  $R_m$  ve  $L$  değişkenleri Denklem (11)'de verilmiştir.

$$R_m = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & R_m & 0 \\ 0 & 0 & R_m \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

Ayrıca, Denklem (10) ve Denklem (11)'deki  $u_{im}$  ( $i = a, b, c$ ),  $u_i$ ,  $i_{im}$  ve  $L_{ij}$  sırasıyla abc koordinatlarındaki stator faz voltajı, abc koordinatlarındaki ters emk kuvveti, abc koordinatlarındaki stator akımları ve stator sargılarındaki indüktanslardır. (bireysel ve karşılıklı indüktanslar birlikte ifade edilmiştir.) (Karşılıklı indüktanslar simetrik kabul edildiğinden  $L_{ij} = L_{ji}$  dir) [20].

Elektrik makinelerinin analizinde d-q transformu faydalı bir yöntemdir. d-q transformu Park çevrimi uygulayarak yapılır. Ayrıca, tanımlanan q ekseninin sürekli anlık stator manyeto motor kuvveti ile çakıştığı kabullenilir, böylece rotor açısız hızıyla aynı hızda dönmüş olur. Sıfır dizisi elemanları ihmal edilerek Denklem (12) ve (13) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} u_{dm} \\ u_{qm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = (R_s + sL'_s) \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_s & 0 \\ 0 & \omega_s \end{bmatrix} L'_s \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_m = \begin{bmatrix} R_m & 0 \\ 0 & R_m \end{bmatrix}, \quad L'_s = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$u_d = \omega_s \psi_{qm}, \quad u_q = \omega_s \psi_{dm}$$

d-q çerçevesindeki akı bağlantıları stator akımları, indüktansları ve rotordaki kalıcı mıknatıslardan statora akan  $\varphi_m$  akı bağlantısı olarak ifade edilebilir.

$$\psi_{dm} = L_d i_{dm} + \psi_m \quad (14)$$

$$\psi_{qm} = L_q i_{qm} \quad (15)$$

Denklem (12)'yi tekrar yazarsak Denklem (16) elde edilir.

$$s \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_m}{L_d} & \omega_s \\ -\omega_s & \frac{-R_m}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{dm}}{L_d} \\ \frac{u_{qm} - |u|}{L_q} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$|u| = \omega_s \psi_m \quad (17)$$

Rotor d-q çerçevesinde aktif ve reaktif güç akışı Denklem (18) ve (19)'da verilmiştir.

$$p = \frac{3}{2}(v_{dm}i_{dm} + v_{qm}i_{qm}) \quad (18)$$

$$q = \frac{3}{2}(v_{dm}i_{qm} - v_{qm}i_{dm}) \quad (19)$$

Elektromanyetik tork ise Denklem (20)'de verilmiştir.

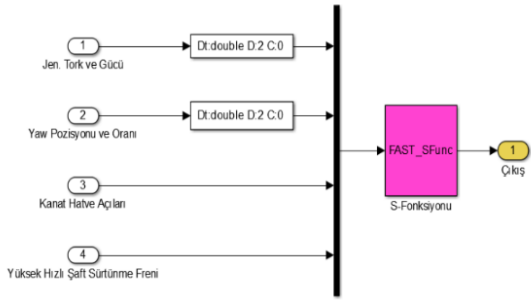
$$T_e = \frac{3}{2}p_p(\psi_{qm}i_{qm} + (L_d - L_q)i_{dm}i_{qm}) \quad (20)$$

Çıkık kutuplu olmayan makineler için bu analiz yapılabilir. Çünkü stator sargılarının d ve q indüktansları  $L_d$  ve  $L_q$  yaklaşık olarak birbirine eşittir. d eksenini akımı olan  $i_{dm}$ 'nin elektrik torku  $T_e$ 'ye bir katkısı olmaz.

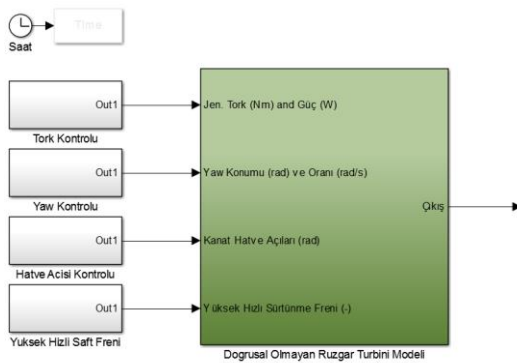
### 2.3 FAST rüzgâr türbini analiz programı

FAST, Amerika Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından yapılmış bir rüzgâr türbini simülátörüdür. Simülátör, Fortran dilinde yazılmış ve Matlab/Simulink'de bir S-fonksiyonu olarak çalıştırılabilmektedir. FAST altprogramları, standart Matlab altprogramlarına bağlanabilmekte böylece S\_fonksiyonlarıyla yazılmış hareket FAST denklemlerinin Simulink modeli ile birleştirilmesini sağlamaktadır. Bu durum rüzgâr türbini kontrol uygulamalarında, simülasyon boyunca büyük esneklik sağlamaktadır. Simulink içerisinde jenerátör tork kontrolü, motor yeri yalpalatma kontrolü ve hatve açısı kontrolü modüllerinin tasarlanabilmesine olanak vermektedir. Böylece FAST içerisindeki bütün doğrusal olmayan havadan kaynaklı kuvvetlere ait rüzgâr türbini denklemleri simülasyonlarda kullanılabilir [21].

FAST, rüzgâr türbininin mekanik yük analizini de yapmakta ve bireysel hatve açısı kontrolüne izin vermektedir. FAST'in simulink modeli Şekil 5'te ve OpenLoop (Açık çevrim) modeli Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5: FAST rüzgâr türbini bloğu.



Şekil 6: OpenLoop.mdl'nin simulink modeli.

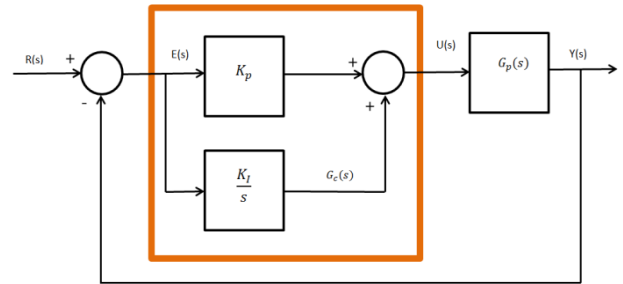
### 2.4 Rüzgâr türbininin mekanik yükleri

Temel olarak statik ve dinamik olmak üzere iki tip mekanik yük vardır. Statik yükler ortalama rüzgâr hızı ile türbinin etkileşimi sonucunda oluşur. Kontrol noktasında daha önemli olan dinamik yüklerdir. Bu dinamik yükler, rotor tarafından süpürülen yüzey üzerinde rüzgâr hızı alanının uzaysal ve geçici dağılımı sebep olur. Dinamik yükler, mekanik yapı üzerinde etkisi olan aerodinamik yükteki değişimleri ve drive-train'den aşağı doğru yayılan aerodinamik torkdaki değişimleri içerir. Bunlar drive-train ve yapısal yükler olarak da adlandırılır.

Dinamik yüklerin yaygın bir sınıflandırması daha vardır. O da fırtınaların ve dalgalanmaların sebep olduğu geçiş yükleridir ve ağırlıklı olarak düşük frekanslıdır. Özellikle rüzgâr türbini parçalarının değerlerinin hesaplanmasında kullanılan geçiş yükleri yüksek rüzgâr hızlarında çok önemlidir. MPPT takibi (I. bölge) ve güç regülasyonu (III. bölge) arasındaki geçiş, nominal rüzgâr hızının üzerinde güç sınırlama geçiş yüklerini doğrudan etkiler. Uygun olmayan kontrol stratejilerinin güçlü geçiş yüklerine sebep olmaları kaçınılmazdır. Ayrıca kontrolörün tasarımı ve ayarı da geçiş yüklerini etkiler. Gerçekten kararlı durum kontrol strateji eğrisini sıkı sıkıya takip eden bir kapalı çevrim sisteminde, fırtına esnasında daha ağır geçiş yükleri olacaktır. Bu yüzden kontrol stratejisi planlanırken bu yükler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Dairesel örnekleme, rotor hızının katlarında yoğunlaşarak spektral olarak tepe yapmış yüksek frekanslı yükler sebep olur. n kanatlı bir rüzgâr türbininde, P harmonik olmak üzere, spektral yükler nP'de baskındır. Bunlar drive-train ve yapıya doğru yayıldığında (bu periyodik yükler), sistemdeki bazı istenmeyen sönümlü titreşimleri harekete geçirir. Daha büyük rüzgâr türbinlerinde türbin parçalarının esnekliği ve kontrol sisteminin önemi bu yüzden artmıştır. Kontrolör tasarımının ve ayarının iyi olması ile kontrol stratejisi bahsi geçen periyodik yükleri yüksek oranda etkiler. Hatve açısı kontrolü yapısal yükleri etkilerken, jenerátörün kontrolü drive-train yüklerinin yayılmasını etkiler. Bu yüzden kötü bir kontrol tasarımı türbini titreşim moduna geçirerek, dişli kutusu veya kanatlar gibi bazı mekanik parçaların hasar görmesine sebep olabilir. Kontrolör, yorulmaya bağlı kırılma riskini ve yüksek frekanslı yükleri mümkün olduğu kadar azaltmak için titreşimi önlemelidir. Diğer bir ifadeyle kontrol stratejisi, kontrolör tarafından sönümlenemeyecek bir titreşime sebep olabilecek herhangi bir çalışma noktasından kaçınılmalıdır.

### 2.5 PI kontrolör yapısı



Şekil 7: PI kontrolörlü bir örnek kontrol sistemi

Kontrolörün integral kısmı kontrolör giriş işaretinin zaman integrali ile orantılı bir işaret üretir. Şekil 7'de örnek bir

kontrol sistemi görülmektedir. PI kontrolörün transfer fonksiyonu Denklem (21)'de verilmiştir.

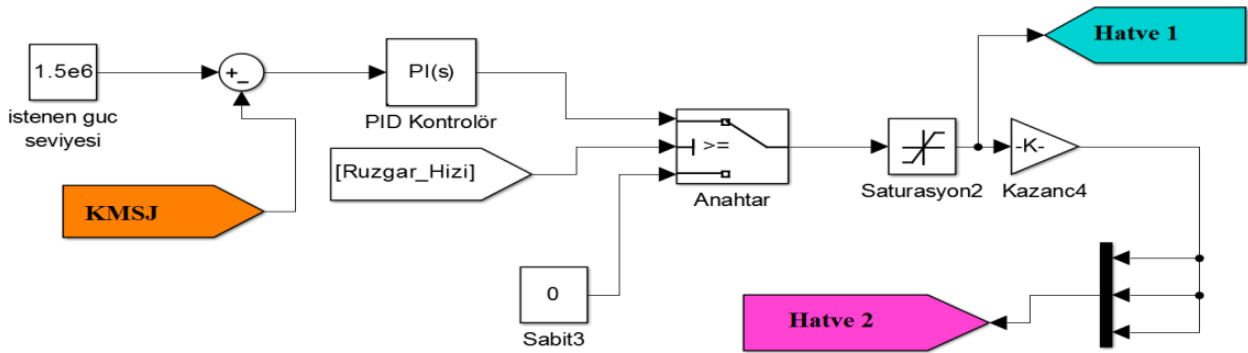
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (21)$$

PI kontrolör, sistemin kararlı hâl hatasını bir derece iyileştirir. Bu durumda belirli bir giriş için kararlı hâl hatası sabit ise, sistem kararlı durumda kaldığı sürece, PI kontrolör kararlı hâl hatasını sıfırlar[18]. Transfer fonksiyonunda 1/s integratörü bulunmayan bir donanımın orantılı kontrolünde, sistemin bir basamak girişine karşı cevabında kararlı durum hatası bulunur. Eğer kontrolöre bir integral kontrol eylemi eklenirse böyle bir hata ortadan kaldırılabilir [22]. PI kontrolör temelinde bir alçak geçiren filtre olduğundan, kontrolörlü sistemin yükselme ve yerleşme zamanı genelde daha uzundur. PI kontrolörün fayda

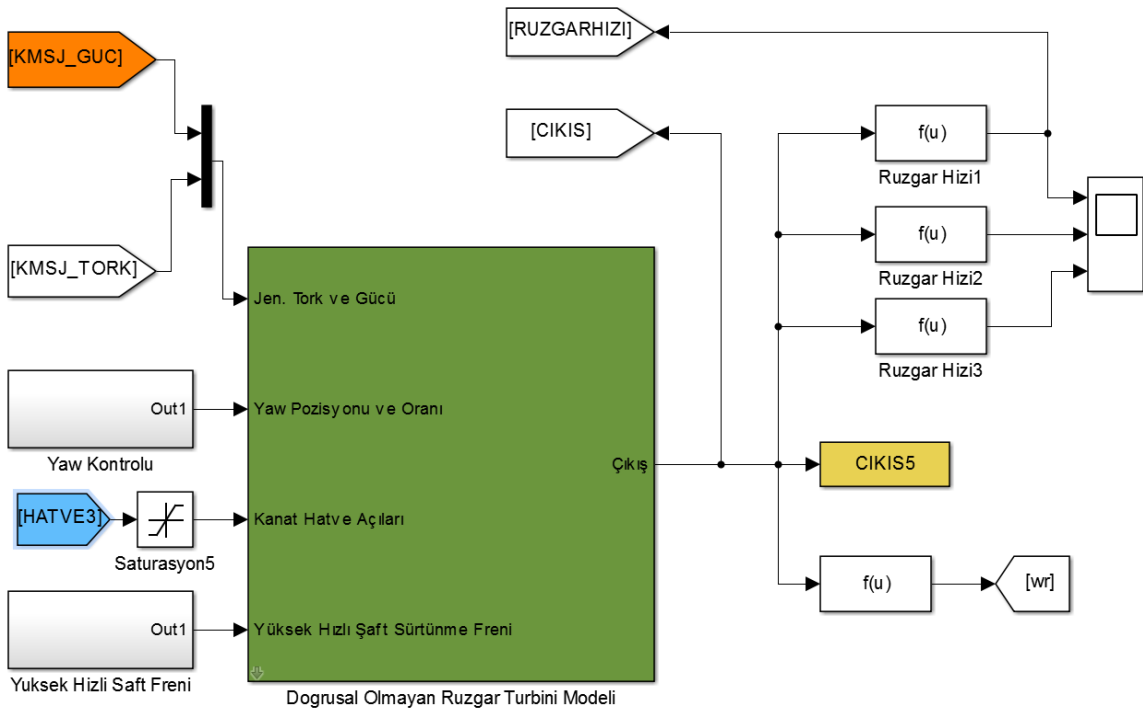
ve sakıncaları şöyle özetlenebilir: Sönümü düzeltir ve aşımı azaltır. Yükselme zamanını artırır. Bant genişliğini azaltır. Kazanç payını, faz payını ve rezonans tepesini (Mr) iyileştirir. Yüksek frekans gürültülerini süzer [23].

## 2.6 Simülasyon modeli

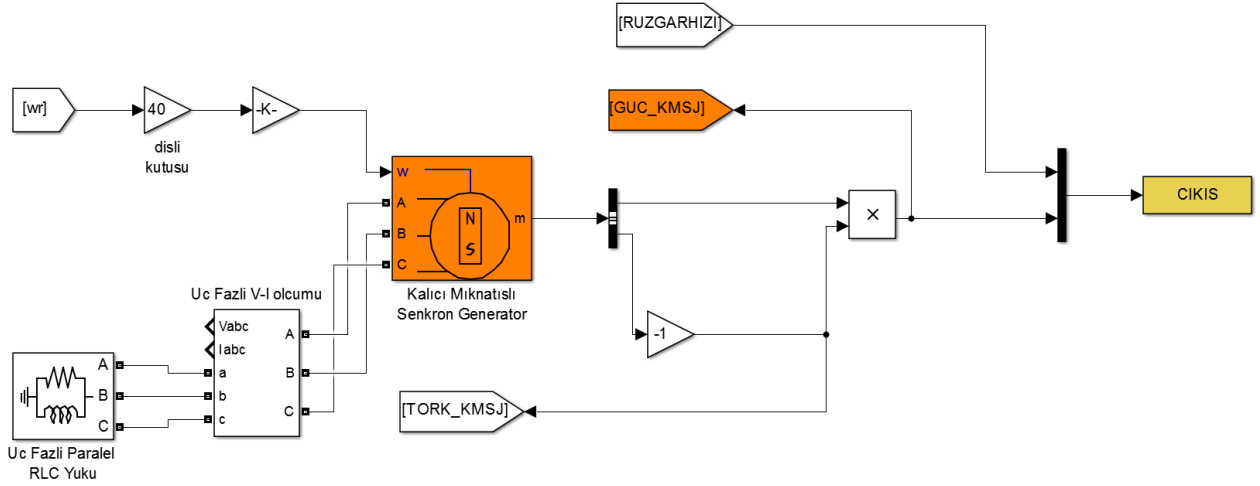
Şekil 8'de gösterildiği gibi simülasyonda, FAST rüzgâr türbini simülatörü ve Matlab/Simulink KMSJ modeli kullanılmıştır. Rüzgâr türbini modeli olarak, gerçek zamanlı olması açısından, FAST programında parametreleri ayarlanabilen 3 kanatlı, 70 m. çapında ve 1500 kW'lık bir rüzgâr türbini modeli hazırlanmıştır. Çıkış gücü kontrolü için PI kontrolör kullanılmıştır. Nominal rüzgâr hızının üzerindeki rüzgâr hızlarında PI kontrolör çıkış gücünü nominal çıkış gücünde tutmak için bir hatve açısı değeri üretmektedir.



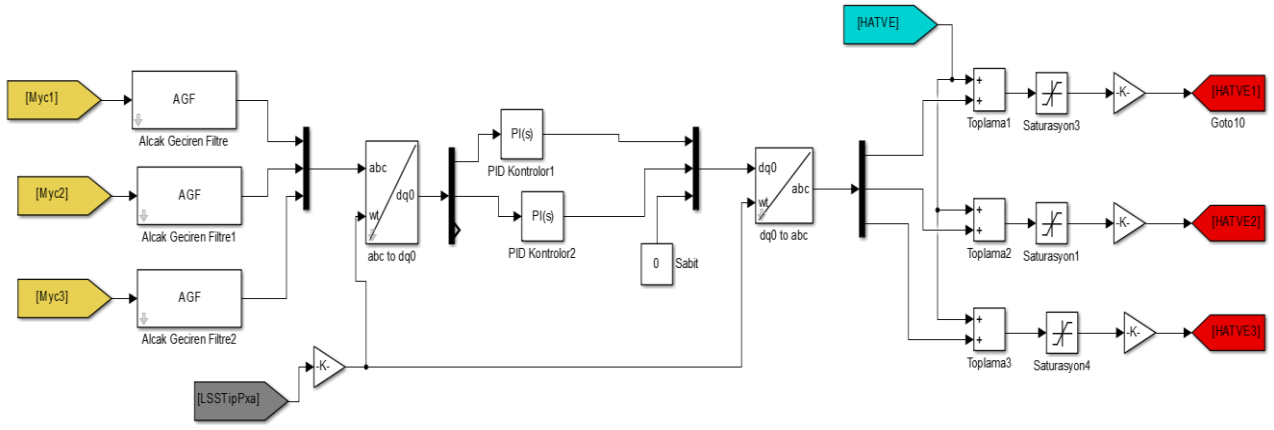
(a): Rüzgâr enerji sisteminin kontrol katı.



(b): Rüzgâr enerji sisteminin türbin katı.



(c): Rüzgâr enerji sisteminin jeneratör ve yük katı.



(d): Rüzgâr enerji sisteminin bireysel hatve açısı üretim katı.

Şekil 8: Simule edilen sistemin Matlab/Simulink modeli.

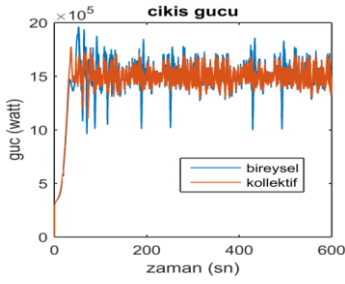
FAST rüzgâr türbini simütöründen rüzgâr türbini kanatlarındaki mekanik yük ile ilgili bilgiler simülasyon esnasında alınmaktadır. Bu mekanik yükler hakkındaki bilgiler alçak geçiren bir filtreden geçirilerek yüksek frekanslı bileşenler süzölmektedir. Her bir kanattaki düşük frekanslı periyodik yükler arasında 120°'lik faz farkı vardır. Bu yükler belirli bir oranda kolektif hatve açısı değerine eklenerek her bir kanat için bireysel hatve açısı değeri üretilir. Böylece yükün fazla olduğu kanat açısı değıştirilerek rüzgâr türbininin kanatları üzerindeki periyodik mekanik yük miktarı azaltılmış olmaktadır.

### 3 Bulgular

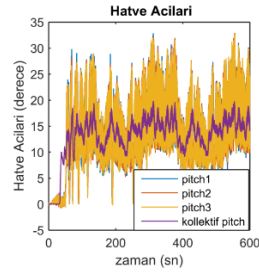
#### 3.1 Simülasyon sonuçları ve tartışma

Simülasyon sonuçlarına göre Şekil 9'da göröldüğü gibi bireysel hatve açısında çıkış gücü küçük bazı anlık değışimler haricinde hemen hemen kolektif hatve açısına yakın bir kararlılık göstermiştir. Şekil 10'da bireysel ve kolektif hatve açılarını birlikte göstermektedir. Bireysel hatve açıları kolektif hatve açısının çevresinde bir salınım göstermektedir. Salınımın büyüklüğü referans olarak alınan RootMyc momentinin çarpıldığı katsayı ile orantılıdır. Bu katsayının en iyi şekilde ayarlanması ayrı bir araştırma konusudur. Şekil 11, bireysel

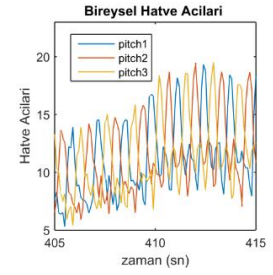
hatve açılarının değışimini daha ayrıntılı olarak göstermektedir. Şekil 11'de göröldüğü gibi bireysel hatve açılarının arasında 120° faz farkı vardır. Bu faz farkı kanat momentlerindeki faz farkından kaynaklanmaktadır. Şekil 12'de uygulanan rüzgâr hızı görölmektedir. Nominal rüzgâr hızı 12 m/s kabul edildiğinden, kontrolörün etkisini göstermek için ortalama rüzgâr hızı nominal hızın üzerinde seçilmiştir. Rüzgâr hızı, dengeli yükler için uygulandığında rüzgâr türbinine dik olarak, x-ekseni boyunca uygulanmıştır. Şekil 13'te (motor yeri ile) kule-tepe/yalpalatma burulma hatve-pitch momenti grafiğı görölmektedir. Şekil 14'te 3. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı (out of plane) momenti görölmektedir. Şekil 13 ve 14'te göröldüğü gibi bireysel hatve açısı kontrolü mekanik yüklerde azalma sağlamıştır. Tablo 1'de ise kolektif hatve açısı ile bireysel hatve açısı kontrolleri arasında mekanik yüklerdeki değerler ve azalma oranları görölmektedir. Mesela Tablo 1'in ilk satırına bakılırsa RootMxb1 ile gösterilen 1. kanatın kanat kökündeki yanlamasına (edgewise) ortalama moment değerinin kolektif hatve açısı kontrolörde 2194.487 kNm, bireysel hatve açısı kontrolörde 2008.03 kNm olduğu göröülüyor. Bu da moment yükünde %9.285543'lük bir azalma demektir. Tablo 2'de moment kısaltmalarının açıklamaları verilmiştir.



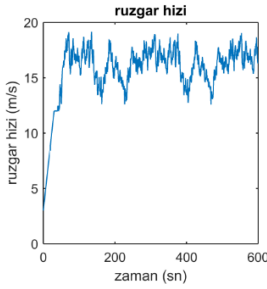
Şekil 9: Çıkış güçleri.



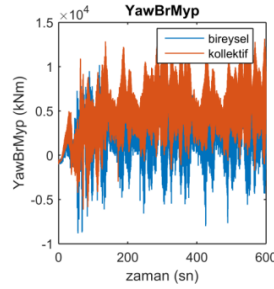
Şekil 10: Hatve açıları.



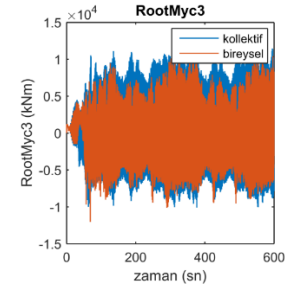
Şekil 11: Bireysel hatve açıları.



Şekil 12: Rüzgâr hızı.



Şekil 13: Dönmeyen (motor yeri ile) kule-tepe/yalpalatma burulma hatve-pitch momenti.



Şekil 14: 3. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane momenti.

Tablo 1: Bireysel ve kolektif hatve açısı kontrollerinin moment sonuçlarının karşılaştırılması.

Moment Ölçümleri	Kolektif hatve açısı (ortalama moment)	Bireysel hatve açısı (ortalama moment)	% değişim
RootMxb1	2194.487	2008.03	9.285543
RootMyb1	4557.224	4040.543	12.78741
RootMzb1	205.5431	163.4764	25.73255
RootMxc1	2552.631	2308.428	10.57877
RootMyc1	4285.349	3855.843	11.13908
RootMxc2	2561.214	2317.367	10.52258
RootMyc2	4247.61	3862.494	9.970666
RootMzc2	205.9017	166.4313	23.71572
RootMxb2	2201.479	2019.654	9.002757
RootMyb2	4517.162	4063.63	11.16075
RootMxc3	2565.616	2275.024	12.77317
RootMyc3	4250.969	3924.696	8.313352
RootMzc3	204.1847	166.6454	22.5265
RootMxb3	2198.077	1965.342	11.84192
RootMyb3	4514.711	4103.968	10.00843
TwrBsMxt	7687.397	6300.246	22.01742
TwrBsMzt	7612.432	7161.928	6.290254
YawBrMyn	5084.287	3170.983	60.33786
YawBrMzn	7611.634	7161.109	6.291278
YawBrMxp	779.0321	703.1667	10.7891

Tablo 2: Moment açıklamaları.

Moment Ölçümleri	Açıklama
RootMxb1	1. kanatın kanat kökündeki yanlamasına-edgewise moment
RootMyb1	1. kanatın kanat kökündeki savurma-flapwise moment
RootMzb1	1. kanatın kanat kökündeki hatve-pitch moment
RootMxc1	1. kanatın kanat kökündeki düzlem-in plane moment
RootMyc1	1. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane moment
RootMxc2	2. kanatın kanat kökündeki düzlem-in plane moment
RootMyc2	2. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane moment
RootMzc2	2. kanatın kanat kökündeki hatve-pitch moment
RootMxb2	2. kanatın kanat kökündeki yanlamasına-edgewise moment
RootMyb2	2. kanatın kanat kökündeki savurma-flapwise moment
RootMxc3	3. kanatın kanat kökündeki düzlem-in plane moment
RootMyc3	3. kanatın kanat kökündeki düzlem dışı-out of plane moment
RootMzc3	3. kanatın kanat kökündeki hatve-pitch moment
RootMxb3	3. kanatın kanat kökündeki yanlamasına-edgewise moment
RootMyb3	3. kanatın kanat kökündeki savurma-flapwise moment
TwrBsMxt	Kule taban yuvarlanma-roll moment
TwrBsMzt	Kule taban yalpalatma moment
YawBrMyn	Dönen (motor yeri ile) kule-tepe/yalpalatma burulma hatve-pitch moment
YawBrMzn	kule-tepe/yalpalatma burulma yalpalatma moment
YawBrMxp	Dönmeyen (motor yeri ile) kule-tepe/yalpalatma burulma yuvarlanma-roll moment

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada KMSJ'li Rüzgâr Enerji sistemlerinde hatve açı kontrolü yapılmıştır. Bu amaçla, mekanik yüklerin tespitinde kullanılan FAST yazılımından veri elde edilerek Matlab-Simulink'te kurulan KMSJ'li rüzgâr türbinine verilmiştir. Burada amaç simülasyonun gerçekçi olması ve her iki durumun bir arada kontrol edilebildiğinin gösterilmesidir. Bireysel hatve açısı kontrolü rüzgâr türbinindeki mekanik yüklerin bir kısmını azaltmak için bir çözüm olarak tavsiye edilebilir. Bu çalışmada incelenen mekanik yükler dengeli ve periyodik olanlardır. Bu yükler rüzgâr türbininin kanatlarına dik olarak x-ekseni boyunca gelen rüzgârlardan oluşmaktadırlar. Türbinde oluşan mekanik yüklerle eş zamanlı olarak türbin kanatlarının hatve açıları bireysel olarak kontrol edilmektedir ve bu yüklerin düşük frekanslı bileşenleri azaltılmaktadır. Böylece rüzgâr türbininin mekanik parçalarındaki yorulma miktarlarını azaltmak mümkün olabilmektedir. Tablo 1 incelendiğinde, her üç kanat için de ortalama %10 mekanik yük azaltımı olduğu görülmüştür. Bu yükler, rüzgâr türbininin bütün kısımlarında azalacağından ve rüzgâr türbinindeki %10'luk mekanik yük azaltımı, türbin ömründe en az bu oranda bir artışa sebep olacağından, sistemde bireysel hatve kontrolünün önemi ortaya çıkmıştır. Böylece çalışmanın önemi de ortaya konmuştur. Ayrıca, daha sonra yapılacak çalışmalarda farklı kontrolör teknikleri uygulanarak hassasiyet arttırılacaktır. Dahası simülasyon çalışması ile gerçek bir rüzgar türbininin özellikleri modellenmiş olacaktır.

#### 5 Kaynaklar

- [1] Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N, Higa H, Uezato K, Funabashi T. "Output power control of wind turbine generator by pitch angle control using minimum variance control". *Electrical Engineering in Japan*, 154(2), 10-18, 2006.
- [2] Idowu P. "Fuzzy speed regulation of a wind-turbine DC generator". *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2(1), 27-36, 1996.
- [3] Musyafa A, Harika A, Negara I, Robandi I. "Pitch angle control of variable low rated speed wind turbine using fuzzy logic controller". *International Journal of Engineering & Technology*, 10(5), 21-24, 2010.
- [4] Jian-Jun X, Li-Mei Y, Xiao-Ning QJ, Chun-lei J, Jian-Ren W. "Study of variable-pitch wind turbine based on fuzzy control". *2nd International Conference on Future Computer and Communication*, Wuhan, China, 21-24 May 2010.
- [5] Qi J, Liu Y. "PID control in adjustable-pitch wind turbine system based on fuzzy control". *Industrial Mechatronics and Automation*, Wuhan, China, 30-31 May 2010.
- [6] Civelek Z, Lüy M, Çam E, Barışçı N. "Control of pitch angle of wind turbine by fuzzy pid controller". *Intelligent Automation & Soft Computing*, 22(3), 469-471, 2015.
- [7] Bossanyi E. "Individual blade pitch control for load reduction". *Wind Energy*, 6(2), 119-128, 2003.
- [8] De Battista H, Mantz R, Christiansen C. "Energy-based approach to the output feedback control of wind energy systems". *International Journal of Control*, 76(3), 299-308, 2003.
- [9] Leithead W, De la Salle S, Reardon D. "Role and objectives of control for wind turbines". *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 138(2), 135-148, 1991.
- [10] Bianchi FD, De Battista H, Mantz RJ. *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. 1st ed. La Plata Argentina, Springer Science & Business Media, 2006.
- [11] Bossanyi E. "Further load reductions with individual pitch control". *Wind Energy*, 8(4), 481-485, 2005.
- [12] Larsen TJ, Madsen HA, Thomsen K. "Active load reduction using individual pitch, based on local blade flow measurements". *Wind Energy*, 8(1), 67-80, 2005.
- [13] Selvam K, Kanev S, Van Wingerden J, Van Engelen T, Verhaegen M. "Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction". *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 19(1), 72-91, 2009.
- [14] Tong W. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. USA, Wit Press, 2010.
- [15] Hemami A. *Wind Turbine Technology*. USA, Cengage Learning, 2011.
- [16] Wenjing Z, Hongze X. "Active disturbance rejection based pitch control of variable speed wind turbine". *30th Chinese Control Conference*, Yantai, China, 22-24 July 2011.
- [17] Chen CH, Hong CM, Ou TC. "Hybrid fuzzy control of wind turbine generator by pitch control using RNN". *International Journal of Ambient Energy*, 33(2), 56-64, 2012.
- [18] Hwas A, Katebi R. "Wind turbine control using PI pitch angle controller". *IFAC Conference on Advances in PID Control PID'12*, Brescia, Italy, 28-30 March 2012.
- [19] Rizk J, Nagrial M. "Design of permanent-magnet generators for wind turbines". *3rd International Power Electronics and Motion Control Conference*, Beijing, China, 15-18 August 2000.
- [20] Molina M, Sanchez A, and R. Lede A. "Dynamic modeling of wind farms with variable-speed direct-driven PMSG wind turbines". *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, Sao Paulo Brazil, 8-10 November 2010.
- [21] Guntur SJ, Jonkman JB, Jonkman BQ, Wang QMA, Sprague MM, Hind M. "FAST v8 Verification and Validation for a MW-scale Wind Turbine with Aeroelastically Tailored Blades". *34th Wind Energy Symposium*, Kissimmee, Florida, USA, 4-9 January 2016.
- [22] Ogata K. *System Dynamics*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1998.
- [23] Golnaraghi F, Kuo B. *Automatic control systems*, USA, 2009.